UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA FACULDADE DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA FADIGA TERMOMECÂNICA EM ARGAMASSAS COLANTES NO SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO

JOÃO CARLOS BARLETA UCHÔA

ORIENTADOR: Profo LUCIANO MENDES BEZERRA

TESE DE DOUTORADO EM ESTRUTURA E CONSTRUÇÃO CIVIL

PUBLICAÇÃO: E.TD-005 A/15 BRASÍLIA/DF, 04 DE NOVEMBRO DE 2015

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA FACULDADE DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA FADIGA TERMOMECÂNICA EM ARGAMASSAS COLANTES NO SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO

JOÃO CARLOS BARLETA UCHÔA

TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO POR:
LUCIANO MENDES BEZERRA, Ph.D. (ENC-UnB) (Orientador)
WILLIAN TAYLOR MATIAS SILVA, Dr.Ing. (ENC-UnB) (Examinador Interno)
CLAUDIO H. ALMEIDA FEITOSA PEREIRA, DSc. (ENC-UnB) (Examinador Interno)
ANGELO JUST DA COSTA E SILVA, DSc. (UPE) (Examinador Externo)
CARLOS EDUARDO LUNA DE MELO, DSc. (FAU-UnB) (Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 04 DE NOVEMBRO DE 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

UCHÔA, JOÃO CARLOS BARLETA

Análise Numérica e Experimental da Fadiga Termomecânica em Argamassas Colantes no Sistema de Revestimento Cerâmico.

[Distrito Federal] 2015.

xvi, 214p. 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Estruturas e Construção Civil, 2015).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Sistema de revestimento cerâmico

3. Desplacamento de revestimento

2. Curva S-N de argamassas colantes

4. Fadiga

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

UCHÔA, J. C. B. (2015). **Análise Numérica e Experimental da Fadiga Termomecânica em Argamassas Colantes no Sistema de Revestimento Cerâmico.** Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. TD-005 A/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 214p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: João Carlos Barleta Uchôa

TÍTULO: Análise Numérica e Experimental da Fadiga Termomecânica em Argamassas

Colantes no Sistema de Revestimento Cerâmico.

GRAU: DOUTOR ANO: 2015

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma cópia para esta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

João Carlos Barleta Uchôa Rua 16 Sul, Lote 04, Apto 1208 – Águas Claras 71.940-180, Brasília, DF – Brasil joão.barleta@gmail.com

A Deus por tudo. Aos meus pais, Francisco Uchôa e Maria Lúcia, a minha esposa, Lucinéia Turnes, que eu amo muito, aos meus irmãos Junior, Antonio e Lúcio, pelo incentivo na conquista dessa etapa da minha vida. A minha eterna gratidão a todos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor e orientador Luciano Mendes Bezerra, o meu sincero agradecimento, inicialmente, pela amizade e confiança mútua, por suas competências e conhecimentos compartilhados, pela orientação, dedicação, incentivo, sugestões valiosas e participação efetiva e indispensável neste trabalho.

À minha família, pelo incentivo e apoio demonstrados em todos os momentos.

À Lucinéia, minha esposa, pelo carinho, paciência, dedicação, incentivo, confiança e apoio fundamentais durante todo este trabalho.

Aos meus amigos do PECC, em especial, ao Anderson, Carlos Mariano, Marcus e Evangelista, obrigado pelo apoio e colaboração na realização deste trabalho e, principalmente, pelo companheirismo, carinho e amizade. Desejo que esses sentimentos continuem para sempre.

Aos amigos Marcus Alexandre e Wellington, companheiros de estudo desde o mestrado, muito obrigado pelo excelente grupo que formamos para superar os desafios das disciplinas do curso e melhorar, de modo geral, o aprendizado.

Aos colegas do Departamento de Estruturas da UnB, Nelson, Jessica, Gelson, Fabiano, Agno, Almerio, Claudia, Eduardo e Wanderlei.

A todos os amigos do doutorado e mestrado que conheci nesse período e que, direta ou indiretamente, me ajudaram neste trabalho.

Aos professores do PECC, pela amizade e conhecimentos transmitidos.

Aos secretários do PECC, Eva e Ricardo, pela amizade e companheirismo.

Ao professor Alex e ao aluno Marcos do Departamento de Engenharia Mecânica, pelo apoio dado na realização dos ensaios de fadiga.

RESUMO

Autor: João Carlos Barleta Uchôa Orientador: Luciano Mendes Bezerra

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 2015

Análise Numérica e Experimental da Fadiga Termomecânica em Argamassas Colantes no Sistema de Revestimento Cerâmico.

Uma das principais patologias do sistema de revestimento cerâmico é o destacamento de peças cerâmicas por fissuração do material de fixação das peças. Há um desconhecimento, por parte dos projetistas e normas técnicas, do real comportamento dos materiais dos sistemas de revestimentos sob ação de intempéries, como a variação de temperatura ao longo do dia. Os deslocamentos gerados pela variação da temperatura produzem tensões no interior do sistema de revestimento. A diferença no comportamento térmico e higrométrico dos materiais das camadas do sistema de revestimento origina deformações e tensões diferentes entre essas camadas. Este trabalho utiliza uma abordagem experimental e numérica para o estudo do comportamento da fadiga das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII. Tais argamassas compõem o sistema de revestimento cerâmico sob carregamento cíclico de tensões. Na abordagem experimental, foram realizados ensaios de caracterização para identificar a resistência à tração e à compressão, a consistência da pasta e o módulo de elasticidade das argamassas ACII e ACIII. Em seguida, foi proposta uma metodologia de ensaio de fadiga das argamassas ACII e ACIII sob tração e compressão axiais. Os resultados dos ensaios de fadiga permitiram traçar a Curva S-N de Wöhler e obter o limite de resistência à fadiga das argamassas ACII e ACIII. Na abordagem de análise numérica, utilizou-se o método dos elementos finitos para se propor uma metodologia para a avaliação das tensões geradas no sistema de revestimento cerâmico submetido a um transiente térmico conservador representativo de Brasília, DF. Com os valores das tensões alternadas obtidos das análises numéricas, é possível, com a metodologia apresentada, avaliar a resistência à fadiga das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII em sistema de revestimento cerâmico de fachadas.

Palavras-chave: Sistema de Revestimento Cerâmico. Curva S-N de Argamassas Colantes. Desplacamento de Revestimento. Fadiga.

ABSTRACT

Author: João Carlos Barleta Uchôa Advisor: Luciano Mendes Bezerra

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 2015.

Numerical and Experimental Analysis of Thermomechanical Fatigue in Adhesive Mortars in Ceramic Coat System

One of the main pathologies of the ceramic coating facades is the detachment of ceramic tiles by cracking of the material for fixing the tiles. On the part of designers and technical standards, there is a lack of knowledge of the real behavior of the materials in coatings systems exposed to hazardous weather conditions like the everyday variation of weather temperature. The displacements generated by temperature variations produce stresses within the ceramic coating system. The difference in the thermal and hygrometric behavior of the materials in the different layers of the coating system affords different deformations and stresses between those layers. This work uses experimental and numerical investigations to study the fatigue behavior of industrialized adhesive mortars known as ACII and ACIII. Those mortars compose the ceramic coating system subjected to cyclic stresses. In the experimental investigation, testes were undertaken to characterize traction and compression resistance, consistency, and modulus of elasticity of ACII and ACIII mortars. Afterwards, a methodology for fatigue testing of mortars ACII and ACIII under axial traction and compression was proposed. The fatigue test results allowed plotting the S-N Wöhler curve and get the fatigue resistance limit of mortars ACII and ACIII. In the numerical analysis approach, the finite element method was used to set a proposed methodology for evaluating the stresses generated in the ceramic coating system under a conservative thermal transient typical of Brasilia, DF. With the values of the alternating stresses obtained by numerical analysis, it was possible, with the proposed methodology, to evaluate the fatigue resistance of the industrialized adhesive mortars ACII and ACIII in ceramic coating facades.

Keywords: Ceramic Coating System. S-N Curve of Adhesive Mortars. Coating Detachment. Fatigue.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS	3
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	PESQUISAS SOBRE SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO	
2.2	PESQUISAS SOBRE AS TENSÕES NO REVESTIMENTO CERÂMICO	
2.3	PESQUISAS SOBRE RESISTÊNCIA À FADIGA NO SISTEMA DE REVESTIMENTO	13
3	SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO	18
3.1		
	.1.1 Preparo da base (chapisco)	
3	.1.2 Camada de regularização (emboço)	21
3	.1.3 Camada de fixação	22
3	.1.4 Camada de acabamento final	28
	TENSÕES ATUANDO NO SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO SOB O EFEIT MPERATURA	
	ESTUDO DE FADIGA DOS MATERIAIS	
3	.3.1 Processo de propagação da fadiga nos materiais	
	3.3.1.1 Mecânica da fratura	
	3.3.1.2 Curva S-N ou Curva de <i>Wöhler</i>	
	3.3.1.3 Teoria de acúmulo de danos	54
4 CO	METODOLOGIA DA ANÁLISE DA FADIGA DAS ARGAMASSAS LANTES INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII	56
4.1	METODOLOGIA DA ANÁLISE EXPERIMENTAL	56
	.1.1 Preparo das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII	50 58
4	.1.2 Procedimento de moldagem e cura dos corpos de prova usados no ensaio de fadiga à compr	essão
	à tração	
4	.1.3 Ensaio das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII	
	4.1.3.1 Ensaio de resistência à tração na flexão	
	4.1.3.2 Ensaio de resistência à compressão axial	
	4.1.3.3 Determinação da consistência da argamassa colante através do cone de penetração	
4	.1.4 Ensaio dinâmico da argamassa colante industrializada	
4.2	METODOLOGIA DA ANÁLISE NUMÉRICA	
	.2.1 Transiente térmico adotado	
4	.2.2 O modelo em Elementos Finitos	75
5	ANÁLISE EXPERIMENTAL	81

		TERIZAÇÃO À FADIGA DAS ARGAMASSAS COLANTES INDUSTRIALIZADA	
5.1.1		terminação da consistência da pasta	
5.1.2		terminação da consistencia da pastaterminação da resistência à tração na flexão	
5.1.3		terminação da resistência à compressão axial	
5.1.2		terminação do módulo de elasticidade na flexão	
3.1.2	+ DC	terminação do modulo de erasticidade na nexão	63
		OS À FADIGA DAS ARGAMASSAS COLANTES ACII E ACIII	
5.2.1		saio de fadiga à tração axial	
5.2.2	2 En	saio de fadiga à compressão axial	87
5.3 C	CURVA	S S-N PARA AS ARGAMASSAS COLANTES ACII E ACIII E ARGAMASSA DE	
EMBO			
5.3.1		rvas S-N de fadiga à compressão e à tração para argamassa colante industrializada ACII	
5.3.2		rvas S-N de fadiga à compressão e à tração para argamassa colante industrializada ACIII	
5.3.3	3 Cu	rvas S-N de fadiga à compressão e tração da argamassa de emboço	95
6 A	NÁL	ISE NUMÉRICA DAS TENSÕES	. 98
6.1 A	NIÁT TO	SE DE TENSÕES E DE FADIGA	100
0.1 A 6.1.1		so-1	
	.1.1.1	Análise da Tensão Normal S _x	
6	.1.1.2	Análise da Tensão Normal S _y	
	.1.1.3	Análise da Tensão de Cisalhamento S _{xv}	
	.1.1.4	Análise da Tensão Principal S ₁	
	.1.1.5	Análise da Tensão Principal S ₂	
6	.1.1.6	Deformada e Concentrada de Tensão	
	.1.1.7	Análise de Fadiga do Caso 1	
6.1.2	2 Ca	so-2	
	.1.2.1	Análise da Tensão Normal S _x	
	.1.2.2	Análise da Tensão Normal S _y	
	.1.2.3	Análise da Tensão de Cisalhamento S _{xy}	
	.1.2.4	Análise da Tensão Principal S ₁	
	.1.2.5	Análise da Tensão Principal S ₂	
	.1.2.6	Deformada e Concentrada de Tensão	
	.1.2.7	Análise de Fadiga do Caso 2	
		80-3	
	.1.3.1	Análise da Tensão Normal S _x	
-	.1.3.2	Análise da Tensão Normal S _y	
	.1.3.3	Análise da Tensão de Cisalhamento S _{xy}	
	.1.3.4	Análise da Tensão Principal S ₁	
	.1.3.5	Análise da Tensão Principal S ₂	
	.1.3.6	Deformada e Concentrada de Tensão	
	.1.3.7	Análise de Fadiga do Caso 3	
6.1.4		so-4	
	.1.4.1	Análise da Tensão Normal S _x	
	.1.4.2	Análise da Tensão Normal S _y	
	.1.4.3	Análise da Tensão de Cisalhamento S _{xy}	
	.1.4.4	Análise da Tensão Principal S ₁	
	.1.4.5	Análise da Tensão Principal S ₂	
	.1.4.6	Deformada e Concentrada de Tensão	
	.1.4.7	Análise de Fadiga do Caso 4	
7 A	NÁL	ISE NUMÉRICA E ANALÍTICA DAS TEMPERATURAS	143
0 0	CONO	IDED A CÕES EINAIS	150
		IDERAÇÕES FINAIS	
Q 1 A	INIA I I	SUCUS DEPONDENTED A COMPANIA DE COMPANIA D	150

8.1.1	Ensaio de fadiga à tração axial da argamassa colante industrializada ACII	151
8.1.2	Ensaio de fadiga à tração axial da argamassa colante industrializada ACIII	151
8.1.3	Ensaio de fadiga à compressão axial da argamassa colante ACII	
8.1.4	Ensaio de fadiga à compressão axial da argamassa colante ACIII	
8.2 AN	ÁLISE NUMÉRICA DAS TENSÕES	152
8.3 AN	ÁLISE NUMÉRICA E ANALÍTICA DAS TEMPERATURAS	155
8.4 TR	ABALHOS FUTUROS	156
REFER	ÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
APÊND	ICE A	167
CÁLC	ULO DO TRANSIENTE DE TEMPERATURA NA FACHADA	167
	ULO DO TRANSIENTE TÉRMICO VIA MÉTODO ANALÍTICO	
FORM	ULAÇÃO MATEMÁTICA DO TRANSIENTE TÉRMICO	179
CÁLC	ULO DA FACHADA EQUIVALENTE	207
APÊND	ICE B	213
	LTADOS DOS ENSAIOS ESTÁTICOS DAS ARGAMASSAS COLANTES ACII E	

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - AÇÕES IMPOSTAS ÀS SUPERFÍCIES EXTERNAS E INTERNAS DE UMA EDIFICAÇÃO	1
FIGURA 1.2 - DESPLACAMENTO DE REVESTIMENTO CERÂMICO.	2
FIGURA 3.1 - ESTRUTURA DE SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO	19
FIGURA 3.2 - DETALHE DA JUNTA DE MOVIMENTAÇÃO. ABNT NBR 13755:1996. (COSTA E SILVA, 2014)	32
FIGURA 3.3 - SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO NA TEMPERATURA INICIAL T ₀ .	34
Figura 3.4 - Processo de cisalhamento no sistema de revestimento cerâmico $T_1 > T_0$	34
Figura 3.5 - Sistema de revestimento cerâmico após queda de temperatura $T_2\!<\!T_0$	35
Figura 3.6 - Tensão de compressão atuando no sistema de revestimento cerâmico	35
FIGURA 3.7 - REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS "P" E "Q" ATUANDO NO REVESTIMENTO CERÂMICO	36
FIGURA 3.8 - SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO ENTRANDO EM COLAPSO.	36
FIGURA 3.9 - COLAPSO DO SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO.	37
FIGURA 3.10 - DADOS UTILIZADOS PARA OS ENSAIOS DE FADIGA. (MAGNABOSCO, 2000)	39
FIGURA 3.11 – (A) CURVA DE <i>VON MISES</i> (B) CURVA DE <i>COULOMB-MOHR</i> PARA MATERIAIS FRÁGEIS	42
FIGURA 3.12 - CURVAS DE RESISTÊNCIA PARA MATERIAL FRÁGIL DURANTE OS CICLOS DE CARGA	43
FIGURA 3.13 – CURVA S-N ADOTADA PARA ARGAMASSAS COLANTES INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII	44
FIGURA 3.14 - PROCESSO DE PROPAGAÇÃO DA FADIGA. (UCHÔA, 2007)	45
FIGURA 3.15 - UM CORPO DE PROVA COM UM FURO ELÍPTICO SOB CARGA DE TRAÇÃO. (GRIFFITH, 1920)	48
FIGURA 3.16 - MODOS DE CARREGAMENTO BÁSICO DE UMA TRINCA.	50
FIGURA 3.17 - ABERTURA DE TRINCA SOB TENSÃO UNIFORME NORMAL AO PLANO. (GRIFFITH, 1920)	51
FIGURA 3.18- ABERTURA DE TRINCA SOB TENSÃO UNIFORME E COORDENADAS NA FRENTE DA TRINCA.	
(Anderson, 1995)	52
Figura 3.19 - Curva S-N ou curva de <i>Wöhler</i> .	53
Figura 4.1 – Programa experimental para traçar a curva S-N de fadiga das argamassas	
COLANTES INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII.	57
FIGURA 4.2 - ARGAMASSAS COLANTES INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII	58
FIGURA 4.3 - PROCEDIMENTO DAS MISTURAS DE ACORDO COM O FABRICANTE DAS ARGAMASSAS COLANTES	3
INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII	59
FIGURA 4.4 - MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA EM ARGAMASSA COLANTE	60
FIGURA 4.5 - EQUIPAMENTO E O CORPO DE PROVA SENDO RETIFICADO PARA O ENSAIO DE FADIGA À	
COMPRESSÃO.	61
FIGURA 4.6: (A) CORPO DE PROVA. (B) MECANISMO DE FIXAÇÃO NA GARRA DO MTS 810	62
FIGURA 4.7 – FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO DE UMA BARRA RETANGULAR SOB TRAÇÃO	62
FIGURA 4.8 – (A) FORMA METÁLICA DE CHAPA DE AÇO DO CORPO DE PROVA. (B) MOLDAGEM DOS CORPOS E	ЭE
PROVA PARA ENSAIO DE FADIGA À TRAÇÃO.	63
Figura 4.9 - Ensaio de resistência à tração na flexão	
FIGURA 4.10 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.	
FIGURA 4.11 - ENSAIO DE CONSISTÊNCIA DA ARGAMASSA COLANTE ATRAVÉS DO CONE DE PENETRAÇÃO	
FIGURA 4.12 - FOUIDAMENTO MTS 810 MATERIAL TEST SYSTEM	69

FIGURA 4.13 – CORPOS DE PROVA MONTADOS PARA OS ENSAIOS (A) À TRAÇÃO E (B) À COMPRESSÃO	69
Figura 4.14 - Temperatura externa na superfície da cerâmica clara e escura no dia $28/10/2$	2008 EM
Brasília-DF	73
Figura 4.15 – Transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a	
CERÂMICA CLARA E TEMPERATURA INTERNA DO AMBIENTE DE 18°C – Transiente $1.$	74
Figura 4.16 - Transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a	
CERÂMICA CLARA E TEMPERATURA INTERNA DO AMBIENTE DE $25^{\circ}C$ – Transiente 2	74
FIGURA 4.17 - TRANSIENTE TÉRMICO NA SUPERFÍCIE EXTERNA DO SISTEMA DE REVESTIMENTO PARA A	
CERÂMICA ESCURA E TEMPERATURA INTERNA DO AMBIENTE DE $18^{\circ}C$ – Transiente 3	75
Figura 4.18 - Transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a	
CERÂMICA ESCURA E TEMPERATURA INTERNA DO AMBIENTE DE $25^{\circ}C$ – Transiente 4	75
FIGURA 4.19 - ESTRUTURA DE REVESTIMENTO CERÂMICO DA ANÁLISE PARA ANÁLISE NUMÉRICA	76
FIGURA 4.20 – GEOMETRIA DOS ELEMENTOS PLANE42 E PLANE55 DO SOFTWARE ANSYS	77
FIGURA 4.21 – ESQUEMA DA DISPOSIÇÃO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS DISCRETIZANDO A ESTRUT	TURA DO
SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO DE FACHADA.	79
FIGURA 4.22 – CONDIÇÃO DE CONTORNO PARA ANÁLISE TERMOMECÂNICA NO ANSYS DA ESTRUTURA	DO
SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO DE FACHADA.	80
FIGURA 5.1 - GRÁFICO DA CURVA S-N DE FADIGA À TRAÇÃO DA ACII.	86
FIGURA 5.2 - GRÁFICO DA CURVA S-N DE FADIGA À TRAÇÃO DA ACIII.	87
FIGURA 5.3 - GRÁFICO DA CURVA S-N DE FADIGA À COMPRESSÃO DA ACII	89
FIGURA 5.4 - GRÁFICO DA CURVA S-N DE FADIGA À COMPRESSÃO DA ACIII.	90
FIGURA 5.5 - CURVAS S-N DE FADIGA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO DA ACII.	91
FIGURA 5.6 - CURVAS S-N DE FADIGA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO LINEARIZADAS PARA ACII	91
FIGURA 5.7 - CURVAS S-N DE FADIGA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO DA ACIII	93
FIGURA 5.8 - CURVAS S-N DE FADIGA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO LINEARIZADAS PARA ACIII	93
FIGURA 5.9 - CURVAS S-N DE FADIGA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO DA ARGAMASSA DE EMBOÇO	96
FIGURA 5.10 - CURVAS S-N DE FADIGA À COMPRESSÃO E À TRAÇÃO LINEARIZADAS PARA ARGAMASSA	A DE
Emboço. (Uchôa, 2007)	96
FIGURA 6.1 - ÁREA EM DESTAQUE QUE SERÁ ESTUDADA.	99
FIGURA 6.2 - DETALHE DA SEÇÃO A-A ₁ DA REGIÃO COM OS NÓS DA SEÇÃO.	99
Figura 6.3 - Caso 1: Tensão S_x às 7h e 17h.	101
Figura 6.4 - Caso 1: Tensão S_x do modelo numérico às 7h.	103
Figura 6.5 - Caso 1: Tensão S_x do modelo numérico às 17h.	103
Figura 6.6 - Caso 1: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ às 7h e 17h.	104
FIGURA 6.7 - CASO 1: TENSÃO S _Y DO MODELO NUMÉRICO ÀS 7H.	105
FIGURA 6.8 - CASO 1: TENSÃO S _y do modelo numérico às 17h.	105
Figura 6.9 - Caso 1: Tensão S_{xy} às 7h e 17h.	106
Figura 6.10 - Caso 1: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 7h.	107
FIGURA 6.11 -CASO 1: TENSÃO S _{XY} DO MODELO NUMÉRICO ÀS 17H	107
FIGURA 6.12 – CASO 1: TENSÃO PRINCIPAL S ₁ ÀS 7H E 17H	108

FIGURA 6.13 – CASO 1: TENSÃO PRINCIPAL S_2 ÀS 7H E 17H	
FIGURA 6.14 - CASO 1: TENSÃO DE <i>VON MISES</i> ÀS 7H.	110
FIGURA 6.15 - CASO 1: TENSÃO DE <i>VON MISES</i> ÀS 17H.	111
Figura 6.16 - Caso 2: Tensão S_x às 7h e 17h.	112
Figura 6.17 - Caso 2: Tensão $S_{\scriptscriptstyle X}$ do modelo numérico às 7h	
Figura 6.18 - Caso 2: Tensão $S_{\scriptscriptstyle X}$ do modelo numérico às 17h	114
Figura 6.19 - Caso 2: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ às 7h e 17h.	
Figura 6.20 - Caso 2: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ do modelo numérico às 7h	
Figura 6.21 - Caso 2: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ do modelo numérico às 17h	116
Figura 6.22 - Caso 2: Tensão S_{xy} às 7h e 17h.	116
Figura 6.23 - Caso 2: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 7h	117
Figura 6.24 - Caso 2: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 17h	
FIGURA 6.25 – CASO 2: TENSÃO PRINCIPAL S_1 ÀS 7H E 17H	118
FIGURA 6.26 – CASO 2: TENSÃO PRINCIPAL S_2 ÀS 7H E 17H	119
FIGURA 6.27 - CASO 2: TENSÃO DE <i>VON MISES</i> ÀS 7H.	
FIGURA 6.28 - CASO 2: TENSÃO DE <i>VON MISES</i> ÀS 17H.	121
Figura 6.29 - Caso 3: Tensão S_x às 7h e 17h	
Figura 6.30 - Caso 3: Tensão $S_{\scriptscriptstyle X}$ do modelo numérico às 7h	
Figura 6.31 - Caso 3: Tensão $S_{\scriptscriptstyle X}$ do modelo numérico às 17h	
Figura 6.32 - Caso 3: Tensão $S_{\rm Y}$ às 7h e 17h	
Figura 6.33 - Caso 3: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ do modelo numérico às 7h	126
Figura 6.34 - Caso 3: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ do modelo numérico às 17h	
Figura 6.35 - Caso 3: Tensão S_{xy} às 7h e 17h.	
Figura 6.36 - Caso 3: Tensão $S_{\scriptscriptstyle {\rm XY}}$ do modelo numérico às 7h	
Figura 6.37 - Caso 3: Tensão $S_{\scriptscriptstyle {\rm XY}}$ do modelo numérico às 17h	
Figura 6.38 – Caso 3 - Tensão Principal S_1 às 7h e 17h	
Figura 6.39 – Caso 3: Tensão Principal S_2 às 7h e 17h	
FIGURA 6.40 - CASO 3: TENSÃO DE <i>VON MISES</i> ÀS 7H.	
FIGURA 6.41 - CASO 3: TENSÃO DE <i>VON MISES</i> ÀS 17H.	
Figura 6.42 - Caso 4: Tensão S_x às 7h e 17h.	
Figura 6.43 - Caso 4: Tensão $S_{\scriptscriptstyle X}$ do modelo numérico às 7h	
Figura 6.44 - Caso 4: Tensão $S_{\scriptscriptstyle X}$ do modelo numérico às 17h	
Figura 6.45 - Caso 4: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ às 7h e 17h.	
Figura 6.46 - Caso 4: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ do modelo numérico às 7h	
Figura 6.47 - Caso 4: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ do modelo numérico às 17h	
Figura 6.48 - Caso 4: Tensão S_{xy} às 7h e 17h.	
Figura 6.49 - Caso 4: Tensão $S_{\scriptscriptstyle XY}$ do modelo numérico às 7h	
Figura 6.50 - Caso 4: Tensão $S_{\scriptscriptstyle XY}$ do modelo numérico às 17h	
FIGURA 6.51 – Caso 4 Tensão Principal S_1 às 7h e 17h	
Figura 6.52 – Caso 4: Tensão Principal S_2 às 7H e 17H	140

Figura 6.53 - Caso 4: Tensão de <i>Von Mises</i> às 7h	141
Figura 6.54 - Caso 4: Tensão de <i>Von Mises</i> às 17h	141
Figura 7.1 – Condição de contorno imposta para análise térmica no ANSYS 1	143
Figura 7.2 – Caso 1: Distribuição de temperatura no interior do sistema de revestimento	
CERÂMICO ÀS 17H VIA MÉTODO NUMÉRICO	144
FIGURA 7.3 – CASO 2: DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO SISTEMA DE REVESTIMENTO	
CERÂMICO ÀS 17H VIA MÉTODO NUMÉRICO	144
FIGURA 7.4 – CASO 3: DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO SISTEMA DE REVESTIMENTO	
CERÂMICO ÀS 17H VIA MÉTODO NUMÉRICO	145
FIGURA 7.5 – CASO 4: DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DO SISTEMA DE REVESTIMENTO	
CERÂMICO ÀS 17H VIA MÉTODO NUMÉRICO	145
FIGURA 7.6 – CASOS 1 E 2: TRANSIENTE TÉRMICO VIA MÉTODO NUMÉRICO NA SEÇÃO A-A' DO SISTEMA DE	
REVESTIMENTO CERÂMICO PARA CERÂMICA CLARA	146
FIGURA 7.7 – CASOS 3 E 4: TRANSIENTE TÉRMICO VIA MÉTODO NUMÉRICO NA SEÇÃO A-A' DO SISTEMA DE	
REVESTIMENTO CERÂMICO PARA CERÂMICA ESCURA	146
FIGURA 7.8 – CASOS 1 E 2: TRANSIENTE TÉRMICO VIA MÉTODO ANALÍTICO NA SEÇÃO A-A' DO SISTEMA DE	
REVESTIMENTO CERÂMICO PARA CERÂMICA CLARA	147
FIGURA 7.9 – CASOS 3 E 4: TRANSIENTE TÉRMICO VIA MÉTODO ANALÍTICO NA SEÇÃO A-A' DO SISTEMA DE	
REVESTIMENTO CERÂMICO PARA CERÂMICA ESCURA	147
FIGURA 7.10 – CASOS 1 E 2: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO DIA VIA MÉTODOS ANALÍTICO E	
NUMÉRICO NA SEÇÃO A-A'	148
FIGURA 7.11 – CASOS 3 E 4: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA AO LONGO DO DIA VIA MÉTODOS ANALÍTICO E	
NUMÉRICO NA SEÇÃO A-A'	148

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 - CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS COLANTES - ABNT NBR 14.081:2012	26
Tabela 3.2 - Tipos de argamassa de rejunte e requisitos mínimos. (ABNT NBR 14992:2003)	30
Tabela 4.1 – Resumo dos cálculos do corpo de prova das argamassas colantes industrializa	DAS
ACII E ACIII PARA O ENSAIO DE FADIGA	63
Tabela 4.2 - Variação de temperatura no dia 28/10/2008 – INMET.	72
Tabela 4.3 – Propriedades requeridas do elemento PLANE55. (Uchôa, 2007)	77
Tabela 4.4 – Propriedades requeridas do elemento PLANE42. (Uchôa, 2007)	78
TABELA 4.5– PROPRIEDADES ATRIBUÍDAS AO ELEMENTO PLANE55.	78
TABELA 4.6 – PROPRIEDADES ATRIBUÍDAS AO ELEMENTO PLANE42	79
Tabela 4.7 - Estudo dos casos que serão analisados na análise numérica no ANSYS	80
Tabela 5.1 - Resultado do ensaio da consistência das pastas das argamassas colantes	
INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII	82
Tabela 5.2 - Resultado da tensão de ruptura do ensaio à tração na flexão das argamassas	
COLANTES INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII.	82
TABELA 5.3 - RESULTADO DA TENSÃO DE RUPTURA DO ENSAIO À COMPRESSÃO AXIAL DAS ARGAMASSAS	
COLANTES INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII.	83
Tabela 5.4 - Resultado dos ensaios do módulo de elasticidade na flexão das argamassas	
COLANTES INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII.	83
TABELA 5.5 - ENSAIO DE FADIGA À TRAÇÃO AXIAL DA ARGAMASSA COLANTE INDUSTRIALIZADA ACII	85
TABELA 5.6 - ENSAIO DE FADIGA À TRAÇÃO AXIAL DA ARGAMASSA COLANTE INDUSTRIALIZADA ACIII	86
Tabela 5.7 - Resultado do ensaio de fadiga à compressão da argamassa colante industrializ	ZADA
ACII	88
Tabela 5.8 - Resultado do ensaio de fadiga à compressão da argamassa colante industrializ	ZADA
ACIII	89
Tabela 5.9 - Resultado do ensaio de fadiga da argamassa de emboço. (Uchôa, 2007)	95
Tabela 6.1 - Casos para análise numérica.	98
Tabela 6.2 - Caso 1: Tensão S_x nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	102
Tabela 6.3 - Caso 1: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	104
Tabela 6.4 - Caso 1: Tensão S_{xy} nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	106
Tabela 6.5 – Caso 1: Tensão Principal S_1 nos nós da estrutura do sistema de revestimento	
CERÂMICO.	108
Tabela 6.6 – Caso 1: Tensão Principal S_2 nos nós da estrutura do sistema de revestimento	
CERÂMICO.	110
TABELA 6.7 - CASO 1: TENSÕES PARA O CÁLCULO DE FADIGA NA ARGAMASSA COLANTE INDUSTRIALIZADA	A
ACII E ARGAMASSA DE EMBOÇO.	111
Tabela 6.8 - Caso 2: Tensão S_x nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	113
Tabela 6.9 - Caso 2: Tensão $S_{\scriptscriptstyle Y}$ nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	115
Tarei a 6.10 - Caso 2: Tensão S _{ve} nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	117

TABELA 6.11 – CASO 2: TENSAO PRINCIPAL S_1 NOS NOS DA ESTRUTURA DO SISTEMA DE REVESTIMENTO	
CERÂMICO.	119
Tabela 6.12 – Caso 2: Tensão Principal S_2 nos nós da estrutura do sistema de revestimento	
CERÂMICO.	120
Tabela 6.13 – Caso 2: Tensões para o cálculo de fadiga na argamassa colante industrializai	DA
ACII E ARGAMASSA DE EMBOÇO.	121
Tabela 6.14 - Caso 3: Tensão S_x nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	123
Tabela 6.15 - Caso 3: Tensão S_y nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	125
Tabela 6.16 - Caso 3: Tensão S_{xy} nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	127
Tabela 6.17 – Caso 3: Tensão Principal S_1 nos nós da estrutura do sistema de revestimento	
CERÂMICO.	129
Tabela 6.18 – Caso 3: Tensão Principal S_2 nos nós da estrutura do sistema de revestimento	
CERÂMICO.	130
Tabela 6.19 – Caso 3: Tensões para o cálculo da fadiga na argamassa colante industrializado	DA
ACII E ARGAMASSA DE EMBOÇO.	131
Tabela 6.20 - Caso 4: Tensão S_x nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	133
Tabela 6.21 - Caso 4: Tensão S_y nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	135
Tabela 6.22 - Caso 4: Tensão S_{xy} nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico	137
Tabela 6.23 – Caso 4: Tensão Principal S_1 nos nós da estrutura do sistema de revestimento	
CERÂMICO.	139
Tabela 6.24 – Caso 4: Tensão Principal S_2 nos nós da estrutura do sistema de revestimento	
CERÂMICO.	140
TABELA 6.25 – CASO 4: TENSÕES PARA O CÁLCULO DA FADIGA NA ARGAMASSA COLANTE INDUSTRIALIZA	DA
ACII E ARGAMASSA DE EMBOÇO.	142
Tabela 7.1 - Variação da temperatura interna (Δ t) às 17h via método numérico	146
Tabela 7.2 - Variação da temperatura interna (Δ t) às 17h via método analítico	148
TABELA 7.3 - VARIAÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA (AT) ÀS 17H VIA MÉTODOS ANALÍTICO E NUMÉRICO	149

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As fachadas de revestimentos cerâmicos das edificações, sejam elas de edifícios, casas, entre outros tipos, são os elementos mais expostos às intempéries, como radiação solar, umidade, temperatura, vento, chuva, abrasão, impacto e umidades do solo, as quais possuem agentes agressivos que diminuem a vida útil dos revestimentos das fachadas.

Nesse sentido é importante analisar e compreender o funcionamento dos sistemas de revestimento cerâmicos empregados nas fachadas, o sistema de revestimento cerâmico de fachadas pode apresentar ainda sérios problemas de desplacamento causado, principalmente, por variações de tensões as quais as fachadas estão submetidas. Essas tais variações de tensão advém, principalmente, de variação de temperatura, tais como a variação de temperatura em função do aquecimento da fachada durante o dia e o resfriamento da mesma durante a noite, além das ocasionadas por chuvas e rajadas de vento, entre outras, conforme ilustrado na Figura 1.1.

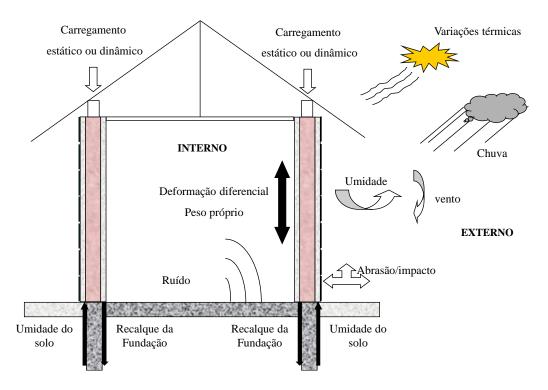


Figura 1.1 - Ações impostas às superfícies externas e internas de uma edificação.

Embora os problemas com o revestimento cerâmico possam ser variados, desde simples eflorescências até o completo desplacamento das peças cerâmicas, Bowman e Westgate (1992) enfatizam que o surgimento de manifestações patológicas não está relacionado a uma única causa, mas a um somatório de fatores que culminam com o surgimento de manifestações patológicas. Observa-se, ainda, que a qualidade e a durabilidade dos revestimentos cerâmicos estão ligadas ao planejamento e a escolha dos materiais, à qualidade do material e da execução e à manutenção do revestimento ao longo de sua vida útil.

Fiorito (1994) ressalta que, de fato, deve-se usar a expressão "estrutura de revestimento". Pois, na realidade, qualquer que seja a natureza do revestimento final de uma parede ou de um piso, deve-se sempre considerá-lo como um conjunto de camadas ligadas entre si. Todas as camadas de suporte do revestimento têm deformações próprias, além do que, no caso de revestimento cerâmico, o material cerâmico nesse sentido pode-se considerar que não é totalmente estável, uma vez que se expande com o menor ou maior grau de deformação ou deslocamento, em função da umidade e da variação térmica, entre outros fatores. Pode ainda acontecer que, com o aumento progressivo dos esforços, atinja-se um estado de tensão, tal que, as peças do revestimento possam se romper ou se descolar e, então, ocorrer uma ruptura de ligação do revestimento com a camada de suporte. Nesse último caso, devido à presença de tensões, se instalará um processo de flambagem local, ficando o revestimento irremediavelmente deteriorado e havendo, inclusive, o desplacamento do revestimento cerâmico como mostrado na Figura 1.2.



Figura 1.2 - Desplacamento de revestimento cerâmico.

Um assunto pouco estudado no Brasil é a durabilidade do revestimento cerâmico perante a ação mecânica originada pelo agente térmico. Quando ocorre a variação de temperatura, produz-se, também, uma variação de deformações devido às diferentes propriedades de dilatação térmica das diferentes camadas de materiais. Essa variação de deformações resulta em tensões, as quais, dependendo da sua magnitude, podem produzir desde fissuração imediata e progressiva, até ruptura das ligações entre o revestimento cerâmico e sua base, podendo resultar na perda de aderência e, consequentemente, o desplacamento do revestimento cerâmico.

Ainda, no que diz respeito às principais patologias que são encontradas no sistema de revestimento, Fiorito (1994) cita que a mais frequente é o desplacamento do revestimento cerâmico. Essa patologia pode ser provocada por inúmeros fatores como, por exemplo:

- Falta de aderência entre as camadas dos diversos materiais;
- A expansão, por umidade, das peças cerâmicas;
- A retração excessiva das argamassas ocasionando fissuras que provocarão uma futura perda de aderência das camadas do revestimento;
- O surgimento de tensões decorrentes de efeito térmico que pode romper o sistema de revestimento cerâmico por fadiga.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Do exposto anteriormente, surge à motivação desta pesquisa, tendo presente não só a importância do tema, ou seja, do entendimento melhor das patologias, principalmente, do desplacamento de revestimentos cerâmicos de fachadas, bem como, das dificuldades a serem encontradas devido ao baixo número de publicações disponíveis nos centros acadêmicos. São raros os estudos encontrados na literatura sobre desplacamento de sistema de revestimento cerâmico aderido gerado por tensões cíclicas de origens térmicas que abordam o tema de forma analítica, numérica e experimental como pretende esta pesquisa.

Portanto, este trabalho tem como base, realizar investigações numérica, analítica e experimental para o estudo das tensões térmicas de natureza cíclica em sistema de

revestimento cerâmico de fachadas. Representa, também, uma continuidade na linha de pesquisa "Sistemas de Revestimentos" conduzida pela Universidade de Brasília (UnB), no PECC, com auxílio de ferramenta experimental, analítica e numérica via Métodos dos Elementos Finitos (MEF), para melhor avaliar as tensões termomecânicas em sistemas de revestimento cerâmico de fachadas e suas consequências, como inicialmente abordado por Saraiva (1998), Silva (2000), Uchôa (2007) e Chagas (2009). Além desses trabalhos citados, há uma linha de pesquisa numérica e analítica que trata de choques térmicos em fachadas abordada por Barbosa (2013) e Moñoz Moscovo (2013), que estudaram o desempenho da camada de emboço da estrutura de revestimento frente à fadiga provocada por ciclos de tensão alternada que surgem em virtude do choque térmico gerado por rachadas de chuvas.

O objetivo geral desta pesquisa é, portanto, analisar o comportamento de sistemas de revestimento cerâmico de fachadas por meio de um estudo experimental das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII, sob carga cíclica, associando este estudo a uma simulação numérica desse sistema de revestimento (com todos os seus materiais componentes do sistema de revestimento cerâmico). Com isso, propõe-se uma metodologia para a avaliação da resistência à fadiga ocasionada por tensões cíclicas de origem termomecânicas que atuam no sistema de revestimento cerâmico, quando o mesmo está submetido às variações de temperatura, oriundas do meio ambiente. Esta pesquisa tem os seguintes objetivos específicos:

- Análise da vida útil do sistema de revestimento cerâmico, com o enfoque da ruptura por fadiga via métodos numérico, analítico e experimental;
- Levantar, experimentalmente, a resistência à fadiga das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII, sobre carregamento cíclico à tração e compressão axial;
- Avaliar os danos do efeito da fadiga na vida útil dos sistemas de revestimento cerâmico;
- Analisar numericamente, utilizando pacote computacional de elementos finitos,
 ANSYS, as tensões provenientes do carregamento térmico.
- Analisar a distribuição da variação da temperatura no sistema de revestimento cerâmico via método numérico.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em oito capítulos. Neste primeiro capítulo apresenta-se a importância e a complexidade do estudo da resistência à fadiga no sistema de revestimento cerâmico causada pelo transiente térmico em argamassas colantes industrializadas, além das motivações e os objetivos a serem alcançados nesta pesquisa.

No segundo capítulo são apresentados os principais trabalhos e pesquisas desenvolvidas sobre o estudo do comportamento de sistema de revestimento cerâmico submetido às solicitações térmicas, assim como a influência das tensões e deformações, e o efeito da fadiga no sistema de revestimento cerâmico.

O terceiro capítulo descreve os conceitos e fundamentos teóricos aplicados nesta pesquisa com relação aos aspectos, fatores e variáveis que influenciam o surgimento de patologias no sistema de revestimento cerâmico e o fenômeno de fadiga. Aborda-se, também, o mecanismo das tensões atuando no sistema de revestimento cerâmico sob o efeito da temperatura, o estudo de fadiga dos materiais, em destaque para a apresentação da curva S-N ou curva de *Wöhler* que mostra o limite de resistência à fadiga do material e, apresentam-se, ainda, os conceitos e fundamentos teóricos da mecânica da fratura e sua influência no estudo da fadiga dos materiais.

O quarto capítulo apresenta a metodologia adotada para o estudo de fadiga em sistema de revestimento cerâmico usada na realização dos ensaios experimentais para a caracterização das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII adotadas neste trabalho, bem como, a metodologia para o ensaio de fadiga dessas argamassas colantes industrializadas, visando à obtenção da Curva S-N ou Curva de *Wöhler*. Além disso, nesse capítulo descreve-se o modelo numérico que simula o sistema de revestimento cerâmico a ser estudado. Aborda-se o elemento finito usado, as condições de contorno impostas no modelo, as equivalências entre fachada completa e modelo numérico reduzido via materiais equivalentes, a malha usada e os carregamentos dos transientes adotados.

O quinto capítulo apresenta e discute os resultados obtidos com os ensaios de caracterização das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII com relação à resistência à tração na

flexão e à compressão axial, consistência da pasta e módulo de elasticidade na flexão. Além disso, são apresentados e analisados os resultados obtidos com os ensaios de fadiga à tração e à compressão axiais dessas mesmas argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

O sexto capítulo apresenta os resultados da análise de tensões e fadiga do sistema de revestimento cerâmico modelado em EF usando o *software* de análise estrutural em elementos finitos ANSYS.

O sétimo capítulo apresenta a variação e distribuição de temperaturas às 17h do dia nas camadas do sistema de revestimento cerâmico para os quatro casos de estudo, usando uma abordagem analítica obtida através do *software* MAPLE e uma abordagem numérica em EF usando o *software* ANSYS.

Por fim, o oitavo capítulo apresenta as considerações finais, conclusões e trabalhos futuros acerca dos resultados obtidos com os ensaios experimentais de fadiga à tração e à compressão axiais das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII e sua relação com as análises de tensão, fadiga e térmica obtidas na simulação do sistema de revestimento cerâmico sob a ação de transientes térmicos em um modelo numérico simplificado em EF usando o *software* ANSYS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados alguns trabalhos já realizados no contexto de sistemas de revestimento cerâmico para fachadas e suas patologias que podem afetar a sua estrutura e comprometer as suas funcionalidades de desempenho.

Além disso, cita-se pesquisas relacionadas ao estudo das tensões no sistema de revestimento cerâmico destacando vários experimentos realizados e modelos em análise numérica desenvolvidos para avaliar os efeitos das tensões e a resistência do sistema de revestimento cerâmico submetido às tensões cíclicas e variadas provocadas pelas variações de temperaturas.

2.1 PESQUISAS SOBRE SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO

Este item apresenta o uso de sistemas de revestimento cerâmico, dando destaque ao estudo das principais patologias e suas causas que danificam a durabilidade e o desempenho do sistema de revestimento cerâmico.

Temoche-Esquivel *et al.* (2005) relatam que, no Brasil, o uso de placas cerâmicas aderidas como revestimentos de fachada é uma tradição, ainda bastante utilizada nos edifícios de múltiplos pavimentos, principalmente, pelo seu potencial em termos de desempenho e, sobretudo, em relação à durabilidade, para enfrentar os agentes externos de degradação. Esta vantagem técnica é respaldada por um setor industrial de cerâmica para revestimento que ocupa uma posição mundial de destaque, contando com um consumo interno da ordem de 1,00 bilhão de m². Em termos econômicos, são movimentados cerca de US\$ 2,32 bilhões pelas 93 indústrias de componentes cerâmicos para revestimento no Brasil, considerando a cadeia produtiva, comercial e de serviços (ANFACER, 2013).

Carasek (2007) apresenta três funcionalidades principais de um revestimento. Inicialmente, destaca que os revestimentos externos tem a função de proteger a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo. Além disso, os revestimentos tem a função de integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com diversas funções, tais como, isolamento térmico, isolamento acústico, estanqueidade à água, segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais. Por fim, o revestimento permite regularizar a superfície dos

elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo para a estética da edificação.

Da Silva *et al.* (1998) chama a atenção de que, apesar do grande desenvolvimento brasileiro no setor de produção de peças cerâmicas para revestimento de paredes e pisos, inclusive com o Certificado de Qualidade dos seus produtos segundo a norma ISO 13006 (*Ceramic tiles - Definitions, classification, characteristics and marking*) e ABNT NBR 13818:1997, são frequentes os relatos de patologias como o desplacamento de peças cerâmicas do revestimento, seja nas primeiras idades do revestimento ou, mesmo, após longo período de utilização.

O sistema de revestimento cerâmico em fachadas, embora muito e tradicionalmente empregado no Brasil, apresenta patologias cujos mecanismos, ainda, são pouco entendidos. Tais patologias podem ter suas origens tanto na falta de planejamento de execução, bem como, na falta de procedimentos de racionalização e controle de execução (Campante e Baía, 2003), na elevada rigidez das argamassas colantes, na umidade, no efeito expansivo da temperatura, associado à variação dos coeficientes de dilatação térmica entre os materiais constituintes do sistema de revestimento e as deficiências (falta de flexibilidade adequada) das juntas (rejuntes) entre as cerâmicas. Todos estes fatores podem contribuir para o aparecimento de patologias no sistema de revestimento cerâmico. Em contrapartida, o sistema de revestimento cerâmico é menos susceptível ao aparecimento de trincas fora dos rejuntes, bolores, empolamento, frequentemente observados nos revestimentos à base de argamassa e pintura ou em acabamentos em pedras naturais, entre outros (Saraiva, 1998).

Durante o processo de produção do sistema de revestimento cerâmico, que inclui o preparo da base, a mistura dos constituintes das argamassas, sua aplicação, acabamento e condições de secagem e cura de cada camada de revestimento cerâmico, inicia-se a formação do mecanismo de aderência. Nesse processo ocorrem vários fenômenos tais como a perda de água da argamassa no estado plástico, a retração plástica, a hidratação do cimento, a formação da rede cristalina, a microfissuração do revestimento, dentre outros que podem vir a afetar a resistência de aderência do sistema de revestimento cerâmico.

Uma vez produzido, ao longo da sua vida útil, o sistema de revestimento cerâmico deverá atender às solicitações mecânicas geradas pelas suas interações nas interfaces e pelos agentes

de degradação que, de modo geral, atuam de maneira aleatória e não uniforme, tornando complexa a análise do potencial de durabilidade e desempenho do revestimento cerâmico. E nesse contexto, haverá uma grande solicitação nas interfaces, sendo de grande importância às resistências de aderências obtidas entre as interfaces.

Em resumo, são vários os fatores que podem levar os sistemas de revestimento cerâmicos a apresentar patologias cujas causas são, ainda, pouco exploradas e estudadas. Neste trabalho acredita-se que o campo de tensão ao qual tais sistemas de revestimento estão sujeitos, bem como, a ciclagem deste campo de tensão constituem fatores importantes cujos mecanismos causadores das patologias devem ser, ainda, melhor entendidos. Portanto, citamos alguns trabalhos encontrados na literatura referentes à análise das tensões e da resistência à fadiga no sistema de revestimento cerâmico, visando um melhor entendimento das manifestações patológicas que ocorrem no sistema de revestimento cerâmico.

2.2 PESQUISAS SOBRE AS TENSÕES NO REVESTIMENTO CERÂMICO

Um dos principais fatores que influenciam na degradação de um sistema de revestimento cerâmico de fachadas é o aspecto climático, uma vez que as variações de temperatura, vento e a umidade provocam deformações ocasionando tensões no revestimento que podem levar à sua ruptura. Neste item apresentamos os resultados de algumas pesquisas publicadas sobre a influência das tensões no sistema de revestimento cerâmico.

Chew (1992) realizou uma pesquisa experimental envolvendo o efeito da indução de tensões de natureza térmica sobre a durabilidade da argamassa colante utilizada no assentamento das placas cerâmicas. Neste experimento foram utilizados dois tipos de substrato de concreto e dois tipos de adesivos B e D. Após sete dias de cura com saco de aniagem, os painéis foram submetidos a 100 ciclos de aquecimento com lâmpadas de infravermelho e resfriamento com a utilização de ventiladores. Os ciclos consistiam em 1 hora de aquecimento e 3 horas de resfriamento. A temperatura aplicada na superfície da placa cerâmica foi de 38°C. Após a realização dos ciclos, foram realizados ensaios de arrancamento das placas cerâmicas. Os testes de arrancamento mostraram que, para ambos os tipos de adesivos B e D, houve uma redução significativa de 18% e 21%, respectivamente, na resistência de aderência das placas cerâmicas, quando comparados aos painéis que não passaram pela ação dos ciclos.

Yoshikawa e Litvan (1994) realizaram trabalho experimental sobre as patologias no sistema de revestimento cerâmico através da análise do efeito das tensões causadas por variações térmicas nesses sistemas. Essa pesquisa focou no estudo dos coeficientes de dilatação térmica e o efeito da umidade através da variação no comprimento das camadas dos materiais. Foi observado que, a deformação nas interfaces do sistema, quando submetido à variações térmicas, apresentou um comportamento viscoelástico, enquanto que, na superfície das camadas foi observado um comportamento elástico. A utilização de epóxi para fixação das peças cerâmicas à camada de argamassa não provocou a redução das tensões nas interfaces estudadas.

Bowman e Banks (1995) realizaram um estudo numérico em elementos finitos para a análise de tensões em fachadas, considerando movimentos diferenciais na interface entre a placa cerâmica e o substrato. O movimento diferencial reversível pode ser induzido de modo térmico ou higroscópico. As tensões oriundas das movimentações entre as camadas do sistema de revestimento podem conduzir à falhas por descamação das placas cerâmicas devido às falhas nos rejuntes ou nos adesivos, ou por fissuras das cerâmicas ou do substrato.

Esses mesmos autores, Bowman e Banks (1995), apresentam que os problemas patológicos nos revestimentos cerâmicos vêm sendo estudados na Austrália desde 1950. Além disso, apresentam que o método dos elementos finitos é o mais eficiente no desenvolvimento de métodos teóricos para estimar os esforços críticos no interior de um sistema de revestimento. Esse método propõe uma modelagem computacional usando elementos finitos para analisar as tensões nos revestimentos cerâmicos onde são consideradas as juntas de assentamento e as juntas de movimento e o revestimento em três camadas. A variação da temperatura utilizada é de 60°C na superfície da placa a 20°C na superfície da camada de fixação.

Silva (2003) da mesma forma que o emboço, as argamassas colantes de assentamento também devem apresentar uma certa deformabilidade para aliviar as tensões de movimentação presentes no revestimento. Porém, da mesma forma, o termo "flexível" utilizado por alguns fabricantes é pouco apropriado, uma vez que pode servir como uma orientação equivocada acerca da real capacidade de deformação do material.

O *Centre Scientifique et Technique du Batiment* (CSTB) (1999), apresenta que existe um fator agravante das tensões já existentes na interface da argamassa colante e a placa cerâmica

que é a variação de temperatura entre a instalação do revestimento e as condições habituais de uso. Além disso, o CSTB descreve que o aumento de tensões em pisos cerâmicos depende de três fatores, que são: cor da placa cerâmica, coeficiente de dilatação térmica da placa cerâmica, e natureza da obra. A influência desses fatores em revestimentos cerâmicos em fachadas foi estudada em uma pesquisa aliada a um modelo matemático e um estudo experimental. Esses estudos mostraram que há um incremento de cerca de 24°C das temperaturas superficiais das placas cerâmicas de cor escura e não esmaltadas. Entretanto, o incremento das temperaturas superficiais nas placas cerâmicas de cor clara e não esmaltadas foi de 5°C. Além disso, o estudo destaca que, quanto mais alto for a edificação, haverá um incremento no nível de tensões de cisalhamento de origem térmica.

Vieira (1998) ressalta a importância de fatores essenciais que contribuem para aliviar uma parcela da tensão no sistema, tais como juntas de dilatação ou de movimentação, espessuras de juntas de assentamento adequadas, utilização de argamassa de rejuntamento deformável e que não apresente resistência à compressão tão elevada.

Da Silva *et al.* (1998), ressalta que tendo em vista as diferentes propriedades físicas e mecânicas dos materiais envolvidos no sistema de revestimento (argamassa, materiais cerâmicos, bloco de concreto, concreto armado e etc.) e as diferentes condições de exposição (temperatura e umidade), surgem movimentos diferenciais entre os materiais. Como os materiais encontram-se vinculados uns aos outros, as deformações não são livres, resultando no aparecimento de tensões. Se essas tensões forem superiores à resistência do material ou à resistência na interface entre os materiais, ocorre então a ruptura.

Silva *et al.* (2000) propõem um modelo baseado em elementos finitos simulando uma parte de uma vedação com revestimento de argamassa por uma face e revestimento cerâmico na outra, num total de cinco camadas onde são analisadas as tensões verticais e tensões de corte nas interfaces das camadas do revestimento.

Saraiva *et al* (2001) realizaram estudos numéricos, via Método dos Elementos Finitos, para analisar as tensões existentes na interface entre a argamassa colante e as peças cerâmicas quando submetidas a esforços de natureza térmica. A análise foi repetida ao se variar a argamassa colante em três situações distintas: variando-se a espessura da camada de emboço, o coeficiente de absorção térmica das peças cerâmicas e o tipo de rejunte utilizado na fachada

cerâmica do modelo numérico estudado. Como resultado, entre outras conclusões do trabalho, observou-se que, apesar destas tensões não sofrerem alterações significativas entre os casos analisados, há uma ligeira diminuição nos valores das tensões nas peças cerâmicas ao se aumentar a espessura do emboço e, um aumento aproximado de 60% nas tensões com a utilização de cerâmica com alto índice de absorção térmica. Neste estudo, também, ficou claro que o uso de rejuntes menos rígidos entre as peças cerâmicas provoca uma considerável diminuição no estado de tensão de compressão nas cerâmicas e um aumento das tensões de cisalhamento entre as camadas internas que compõem o sistema.

Abreu (2001) descreve os principais modelos utilizando elementos finitos e propõe dois modelos um com assentamento das placas cerâmicas no método tradicional e outro com o método não tradicional. O revestimento modelado é de três camadas e com movimentação restrita no modelo, sendo a rigidez dos componentes um dos principais fatores que determinam a magnitude das tensões. Esse revestimento modelado admite um estado plano de deformação e um comportamento elástico e linear dos materiais.

Em 2002, Paes e Carasek realizaram pesquisa experimental para estudar os efeitos do gradiente térmicos no sistema de revestimento cerâmico, focando na avaliação da influência da argamassa de rejuntamento e da variação na espessura das juntas de assentamento. Para o experimento foram utilizados quatro painéis verticais de revestimento cerâmico submetidos a vinte ciclos de aquecimento e resfriamento, com temperatura variando de 23-33°C à 60-70°C. Ao final dos vinte ciclos foram realizados testes de percussão nos revestimentos e de resistência de aderência à tração das peças cerâmicas, além de uma completa caracterização dos materiais empregados no sistema de revestimento cerâmico. Esta pesquisa mostrou que o tipo de argamassa de rejuntamento e as dimensões das juntas de assentamento influenciam no desempenho dos revestimentos cerâmicos quando submetidos à gradientes de temperatura. Os resultados obtidos apontam um melhor desempenho dos revestimentos cerâmicos executados com juntas de assentamento com argamassa de rejuntamento flexível (baixo módulo de elasticidade) ou aqueles assentados com maiores espessuras de junta.

Póvoas *et al.* (2001) observaram que o tempo em aberto é considerado um dos principais requisitos de desempenho da argamassa e um dos fatores mais importantes que o influencia é a perda de água que ocorre tanto na sucção pelo emboço quanto por evaporação para o

meio ambiente que faz diminuir, progressivamente, a resistência de aderência do revestimento cerâmico.

Balbo e Severi (2002) concluíram que, durante o dia, com o aumento da temperatura na face superior de um pavimento de concreto, a placa de pavimento tende a sofrer expansão no topo e contração no fundo da placa, surgindo tensões de reação de tração na parte inferior e tensões de compressão na parte superior da placa de pavimento. À noite, com a diminuição e a queda da temperatura, o processo se inverte com as tensões de reação. Sendo assim, concluíram que o gradiente de temperatura determina a intensidade das tensões de reações que surgem nos pavimentos.

Para Veiga (2003), a transição brusca de ambientes úmidos para ambientes mais secos gera tensões no revestimento cerâmico e reduz a resistência à tração e pode, em muitos casos, provocar fissuração.

Junginger (2003) ressalta que todas as camadas dos sistemas de revestimento devem estar intimamente ligadas entre si para que cumpram todas as suas funções. Dessa forma, as deformações em qualquer uma das camadas provocarão tensões atuantes no sistema de revestimento cerâmico que aplicadas, repetidamente, podem levar ao colapso do sistema. Isto implica que as camadas sobrepostas devem suportar os esforços provenientes das demais camadas a fim de se garantir a estabilidade do sistema de revestimento cerâmico.

Costa e Silva (2004) fala que o sistema de revestimento cerâmico, assim como todas as camadas do revestimento, também permanece submetido aos mais diversos esforços. Ele apresenta, como uma característica intrínseca, dois tipos de movimentações distintos, conforme a solicitação: as irreversíveis, decorrentes do aumento de volume gerado pela absorção de água, também conhecida como expansão por umidade (EPU); e as reversíveis, provocadas pela variação de temperatura.

2.3 PESQUISAS SOBRE RESISTÊNCIA À FADIGA NO SISTEMA DE REVESTIMENTO

A fadiga, tecnicamente, pode ser entendida como uma degradação do material por efeito de solicitações repetidas. Este fenômeno está associado aos estudos para análise da resistência

dos materiais e é caracterizado pelo aparecimento de fissuras que proporcionam a antecipação da deterioração e deformação do material. É um processo de mudança estrutural, progressiva e localizada que ocorre em um ponto do material sujeito às tensões de amplitudes variáveis que produzem as fissuras para totalizar a falha após um determinado número de ciclos (Pereira, 2007). Em virtude da carência de pesquisas sobre fadiga no sistema de revestimento cerâmico e, considerando que o concreto é um material frágil, neste item são apresentados os resultados de pesquisas publicadas na área de fadiga em concreto como, também, em sistema de revestimento cerâmico.

Crescencio e Barros (2003) em seu trabalho de avaliação da influência do choque térmico na durabilidade da aderência de revestimentos de argamassa descreve que entre os agentes ambientais de degradação do revestimento, a variação térmica é a que apresenta um comportamento sazonal que resulta em um carregamento térmico repetitivo no revestimento, com flutuações entre os períodos diurnos e noturnos e entre as estações ao longo do ano. Com relação à fadiga, essa flutuação das tensões produzidas por este tipo de carregamento pode elevar o processo de dano progressivo no revestimento de argamassa, devido ao crescimento e propagação das fissuras preexistentes no corpo e na interface do revestimento. Nesse caso, a recomendação de Lu e Fleck (1998) é aplicar como critério de ruptura a situação em que a fissura preexistente, de maior comprimento se propaga quando o fator de intensidade da tensão máxima atinge a tenacidade à fratura.

O processo de fadiga pode ser dividido em duas etapas: a iniciação da fissura, e a propagação da mesma até resultar na fratura do material. Entretanto, não existe um limite bem definido entre a etapa de iniciação e a de propagação da fissura, pois vários fatores estão envolvidos e influenciam nessa definição, como o tamanho do componente, o material e o método usado para detectar a fissura (Bannantine *et al.*, 1990).

O efeito do transiente térmico no revestimento de fachadas provoca uma variação dimensional (dilatação térmica) que, ao ser restringido pela sua aderência à base e condição de confinamento estrutural, resulta em tensões tanto nas interfaces das camadas do revestimento como ao longo da espessura e ligações das interfaces de cada camada. Em função da magnitude destas tensões, as fissuras produzidas podem ser imediatas e progressivas no revestimento ou, ainda, podem levar à ruptura das ligações entre o revestimento e sua base, podendo resultar, inclusive, na perda de aderência e,

consequentemente, na integridade do sistema de revestimento cerâmico.

No estudo realizado por Tepfers e Kutti (1979) foi desenvolvido um modelo à fadiga apoiado em ensaios à compressão. Posteriormente, os autores verificaram, por meio de análise estatística, que a mesma expressão poderia ser aplicada, também, para ensaios à fadiga em regime de tensão de tração. Tepfers (1982) desenvolveu um ensaio cíclico com tensão alternada usando duas combinações de carregamento: a primeira com tensão de compressão constante na direção horizontal e com tensão de tração variável na direção vertical, e a segunda com tensão de tração constante na direção horizontal e com tensão de compressão variável na direção vertical. Verificou-se, desta maneira, que a tensão alternada afetou o comportamento à fadiga, mas observou-se que o efeito era muito pequeno para descrever um modelo de fadiga. Entretanto este trabalho serviram de base para modelos de fadiga de pavimento de concreto (Cervo, 2004), bem como para ensaios à fadiga de materiais usados em sistema de revestimento cerâmico (Uchôa, 2007).

Tam *et al.* (1993) realizou um trabalho experimental com o propósito de simular, em laboratório, testes de fadiga térmica na aderência de peças cerâmicas. As análises dos testes mostraram que o grau de deterioração aumenta com as maiores faixas de deformação e maior número de ciclos. As taxas médias de força de aderência residual para cada faixa de deformação podem ser aproximadas pela variação linear com número de ciclos de teste. A carga cíclica tem um efeito mais esperado na força de aderência do que na força de cisalhamento. Baseado na maior taxa de deterioração na ligação de aderência, a deterioração significante foi detectada depois de 18.250 ciclos, correspondente a exposição de 50 anos.

Da Silva *et al.* (1998) apresentaram os resultados de uma análise feita em elementos finitos visando estimar as tensões que ocorrem em sistema de revestimento cerâmico quando submetido a variações de temperatura extremas. O modelo numérico simulado representa uma fachada de edifício com orientação norte, revestida com peças cerâmicas em região do país em que ocorrem mudanças significativas de temperatura em curto espaço de tempo. Foram analisadas as interfaces entre revestimento cerâmico e argamassa colante, e entre esta e a argamassa de emboço. Verificou-se que as tensões térmicas geradas nas interfaces podem ser responsáveis pelo desplacamento de peças cerâmicas por fadiga, tendo em vista a resistência mecânica das argamassas colantes utilizadas no assentamento das peças cerâmicas.

Segundo Fiorito (1994), o revestimento poderá, em determinado instante e em função do efeito de uma variação de temperatura, estar sujeito a tensões de compressão, tração e cisalhamento. Uma variação térmica poderá diminuir ou aumentar essas tensões. Uma sequência de variações térmicas, oscilando para mais e para menos, poderá romper, gradativamente, por fadiga, a ligação revestimento/substrato.

Cervo (2004) apresentou os resultados de uma pesquisa experimental sobre a resistência à fadiga de um concreto de cimento Portland convencional para pavimentos rigodo. Esses resultados permitiram a construção de modelos de ruptura por fadiga para material, tipicamente, empregado em obras de pavimentação em São Paulo. Além disso, estudou o processo de fadiga do concreto por meio de ensaios sob regime de tensão constante e sob tensão variável, aferindo os efeitos decorrentes da variação na frequência de aplicação das cargas, bem como, da saturação de amostras. A partir dessa iniciativa experimental de Cervo sobre a resistência à fadiga de um concreto, propõe o estudo da curva de resistência à fadiga das argamassas colantes por meio de ensaios experimentais, buscando analisar o comportamento do sistema de revestimento cerâmico submetido à variação de tensões decorrentes da variação de temperatura ou intempéries.

Uchôa *et al.* (2008) propôs um método numérico-experimental considerando a variação cíclica de temperatura na cidade de Brasília para avaliar a resistência à fadiga de um sistema de revestimento cerâmico. Os autores realizaram ensaios em corpos de prova de argamassa industrializada de emboço sob carga cíclica e verificaram o comportamento à fadiga por tração da argamassa a partir da curva S-N. Essa abordagem da curva S-N é usada para determinar o número de ciclos e a tensão, precedentes à fratura do material, válido quando as deformações plásticas são pequenas, e que relacionam a aplicação das tensões cíclicas (S) para o número de ciclos necessários (N) para que ocorra a fratura do revestimento, determinadas por meio de ensaios experimentais e aplicadas num gráfico. Além disso, Collins (1993) sugere uma abordagem microscópica para utilizar as ferramentas de cálculo analítico da abordagem elástica linear da mecânica da fratura (LEFM), para o caso do revestimento de argamassa, com o objetivo de determinar o nível de concentração de tensões nos defeitos existentes a partir das expressões deduzidas por Griffith.

Chagas (2009) estudou o comportamento de revestimentos à ruptura por fadiga. Entretanto, o foco da autora foi argamassa de emboço utilizada no revestimento cerâmico. A autora apresenta a curva S-N e a curva de *Coulomb-Mohr* para a argamassa de emboço estudada, aplicando os conceitos e a metodologia desenvolvida por Uchôa (2007). A autora, também, verificou que no ensaio de fadiga sob compressão, na medida em que se aumentava o número de ciclos de carregamentos, a resistência à fadiga diminuía até atingir um patamar em que não havia mais ruptura, caracterizando um processo gradual de dano por fadiga e resistência à fadiga.

Barbosa (2013) observou o desempenho da camada de emboço da estrutura de revestimento frente à fadiga provocada por ciclos da tensão alternada que surge em virtude do choque térmico climático. Conclui-se que o choque térmico climático é um evento que pode provocar danos à camada de emboço, contribuindo, em conjunto com outras patologias, para um eventual colapso do sistema de revestimento.

3 SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO

Este capítulo apresenta, inicialmente, o detalhamento da composição de um sistema de revestimento cerâmico formado por um conjunto de camadas. Destaca-se como camada de fixação desse sistema, o uso de argamassas colantes industrializadas para fixar as peças cerâmicas, considerando a sua extensa utilização no mercado e as suas inúmeras vantagens com relação ao uso de argamassas dosadas em obra para o sistema de revestimento. Apresenta-se, ainda, a classificação e definição das argamassas colantes industrializadas em três tipos (ACI, ACII e ACIII), bem como, os tipos de argamassa de rejunte (Tipo I e Tipo II), usada na camada de acabamento final do sistema de revestimento cerâmico. Esta camada é constituída pelas placas cerâmicas e pelas juntas entre essas placas, preenchidas por rejunte (argamassa de rejunte).

A seguir, será discutido o mecanismo das tensões atuantes nas interfaces das camadas do sistema de revestimento cerâmico sob o efeito de temperatura que, a partir das solicitações cíclicas provocadas pelo transiente térmico, podem resultar no colapso do sistema de revestimento cerâmico, e esse fenômeno é denominado fadiga do material. A respeito da fadiga dos materiais, esse capítulo apresenta sua definição e o estudo do processo de propagação da fadiga formado por quatro etapas que, a partir da combinação do aparecimento de uma fissura e o efeito de variações de tensões num determinado período de tempo, pode levar à ruptura do material.

Por fim, apresenta uma abordagem utilizada para a avaliação do comportamento à fadiga dos materiais, que são a curva S-N ou curva de *Wöhler*, juntamente com a teoria da acumulação de danos e a mecânica da fratura.

3.1 ESTRUTURA DO SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO

Dentre os diversos tipos de revestimentos utilizados no Brasil, têm-se os revestimentos com acabamento em cerâmica; em pedras naturais como, a exemplo, o mármore e o granito; em argamassa com pintura; em argamassa com placas laminadas, como madeira ou materiais vinílicos; em argamassa e revestimento têxtil; e em argamassa com papel de parede (Cincotto *et al.*, 1995).

Os revestimentos cerâmicos são constituídos de diversas camadas de materiais diferentes e ligados entre si formando um sistema que deve atender aos requisitos de desempenho inerentes ao sistema de revestimento cerâmico. Essas camadas são distribuídas em base ou substrato, chapisco, argamassa de assentamento, argamassa colante e revestimento cerâmico, como mostrado na Figura 3.1 de Junginger (2003). Como as camadas estão diretamente ligadas entre si, qualquer deformação em uma dessas camadas resultará no aparecimento de tensões em todo o conjunto do sistema de revestimento cerâmico. Tais tensões dependem de todas as características físicas e mecânicas de cada camada, como, por exemplo, da espessura e do módulo de elasticidade (Fiorito, 1994).

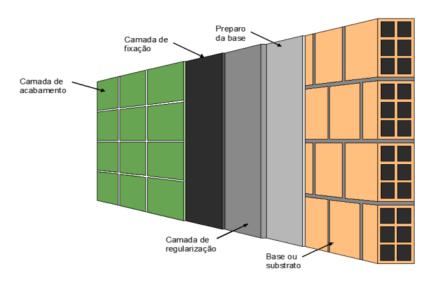


Figura 3.1 - Estrutura de sistema de revestimento cerâmico. Adaptado: (Junginger, 2003).

Apesar dos inúmeros fatores que levam à utilização do sistema de revestimento cerâmico para fachadas, podem ser observadas patologias como o descolamento de peças cerâmicas. Essas patologias decorrem de falhas em materiais, projetos, execução e manutenção, ou seja, falta de conhecimento técnico dos materiais e técnicas construtivas relativas a este sistema de revestimento e falta de especificações construtivas e dos materiais, além da quase ausência de procedimentos de controle de recebimento dos materiais. Para que não ocorram patologias no sistema de revestimento cerâmico, é necessário que esse revestimento apresente as suas propriedades e cumpra as suas funções, contribuindo para o adequado desempenho do edifício como um todo.

As principais funções do revestimento cerâmico são:

- Proteger os elementos de vedação do edifício;
- Auxiliar as vedações no cumprimento das suas funções: isolamento térmico e acústico, estanqueidade à água e aos gases, segurança contra o fogo, dentre outras;
- Regularizar a superfície dos elementos de vedação;
- Proporcionar acabamento final aos revestimentos de pisos e paredes.

Para que os revestimentos cerâmicos possam cumprir as suas funções e apresentar um desempenho adequado em face das condições de uso, são necessárias as seguintes propriedades:

- Aderência: capacidade de permanecer aderido à base ou substrato, ou seja, propriedade do revestimento de resistir a tensões normais ou tangenciais atuantes nas interfaces do sistema;
- Resistência mecânica: capacidade de resistir às solicitações decorrentes do uso, do ambiente e de outros subsistemas;
- Capacidade de absorver deformações: conseguir absorver as deformações causadas pelas tensões aplicadas nos outros subsistemas a que está aderido;
- Isolamento térmico e acústico, estanqueidade à água e aos gases, segurança contra fogo: apresentar característica que proporcionem o isolamento, a estanqueidade e segurança contra fogo;
- Durabilidade e eficiência: permanecer inalterado durante a vida útil do ambiente.

A obtenção dessas propriedades está relacionada às características da placa cerâmica, ao tipo de material utilizado para fixação da placa à base, ao tipo de rejunte, às características da base de aplicação, aos detalhes de projetos e ao procedimento de execução. Portanto, é necessário considerar todos esses aspectos na escolha e aplicação do revestimento cerâmico.

Como cada uma das camadas do sistema de revestimento tem suas características e particularidades próprias, uma abordagem mais especifica será realizada nos itens seguintes.

3.1.1 Preparo da base (chapisco)

Entende-se por chapisco a camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou descontínua, com a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento (ABNT NBR 13529:2013).

O chapisco não deve ser considerado como uma camada de revestimento. É um procedimento de preparação da base, de espessura irregular, sendo necessário ou não, conforme a natureza da base.

A utilização do chapisco tem como objetivo melhorar as condições de aderência da primeira camada do revestimento à base (substrato), de forma a obter maior resistência ao cisalhamento, maior área de contato e uniformidade da base, vinculadas a dois fatores:

- Limitação na capacidade de aderência da base: quando se trata de superfície muito lisa ou com porosidade inadequada, concreto, por exemplo, e bases com capacidade de sucção incompatível com uma boa aderência, como de determinados tipos de blocos de concreto com sucção muito alta ou muito baixa;
- 2. Revestimentos sujeitos às ações de maior intensidade: é o caso de revestimento externo em geral, sujeito às condições de exposição mais severas, que irão provocar ações mecânicas de maior intensidade na interface base/revestimento.

3.1.2 Camada de regularização (emboço)

De um modo geral, a camada de regularização é representada pela argamassa de assentamento (Fiorito, 1994), ou seja, emboço, que tem o objetivo de proporcionar uma superfície adequada para receber as placas cerâmicas com as seguintes características e propriedades:

- Resistência mecânica: capacidade de suportar as placas cerâmicas;
- Planeza: tem por finalidade facilitar o assentamento das placas sem a necessidade de acúmulo de argamassa adesiva em pontos localizados e evitar o surgimento de tensões localizadas. A ABNT NBR 13755:1996, sugere o limite de 3mm para saliência/depressões quando medidas com régua de 2m de comprimento;

 Capacidade de absorver deformações: tem por finalidade conseguir absorver as deformações causadas pelas tensões aplicadas nos outros subsistemas aos quais está aderido (alvenaria, estrutura, por exemplo).

3.1.3 Camada de fixação

Campante e Baía (2003) ressaltam que a função desta camada é manter as placas cerâmicas aderidas ao substrato. Na técnica de assentamento racionalizado são empregadas as argamassas colantes e as colas. A diferença entre esses materiais diz respeito à espessura (relacionado à possibilidade de absorver irregularidade da base) e à capacidade de aderência a bases não porosas (relacionado ao material constituinte).

A camada de fixação é formada, normalmente, pela argamassa colante. Neste trabalho, detalhamos os conceitos e características associados à argamassa colante industrializada que representa o material a ser estudado para o sistema de revestimento cerâmico.

De acordo com a norma ABNT NBR 13755:1996, a argamassa colante industrializada é constituída de aglomerante hidráulico, agregados minerais e aditivos, que possibilita, quando preparada em obra com adição exclusiva de água, a formação de uma pasta viscosa, plástica e aderente.

O revestimento composto por argamassa colante industrializada e peças cerâmicas é largamente empregado nas edificações no Brasil. Além do motivo cultural onde as edificações revestidas com peças são altamente valorizadas, podem-se verificar outros motivos para o emprego em massa desse tipo de revestimento, como por exemplo:

- Com o advento da argamassa colante industrializada, verificou-se uma facilidade de aplicação resultando numa diminuição da mão-de-obra empregada durante o assentamento e menor desperdício de materiais, aumentando desta forma, a produtividade na realização da etapa de revestimento;
- Boa estanqueidade em relação aos agentes externos como, por exemplo, a umidade nas fachadas expostas a intempéries;

- Diminuição do custo e periodicidade de manutenção em relação aos outros tipos de sistemas de revestimentos;
- Evitam patologias comuns em outros tipos de revestimento, como por exemplo, o aparecimento de trincas, bolores e empolamento.

O desenvolvimento das argamassas colantes industrializadas é um dos principais fatores que propiciaram um aumento do uso dos sistemas de revestimento cerâmicos, ficando claro assim, que a indústria de argamassas colantes e a indústria de revestimentos cerâmicos são interdependentes em certo grau. Isso significa dizer que a eficiência de um sistema de revestimento depende, dentre outros, da peça cerâmica empregada e da argamassa colante utilizada.

As pesquisas sobre as argamassas colantes industrializadas começaram nos Estados Unidos a partir do fim da Segunda Guerra Mundial em 1945 com a finalidade de racionalizar os serviços de colocação de revestimentos cerâmicos e oferecer aos consumidores uma alta qualidade nas instalações desses revestimentos a um menor custo possível. Por volta de 1971, foi introduzida a primeira argamassa colante brasileira, porém a preocupação com este material e com as normas pertinentes começaram apenas na década de 90 (Fiorito, 1994).

A argamassa colante industrializada é dosada previamente, fornecida em pó, no estado seco. Atualmente, esse é o material mais utilizado no Brasil para o assentamento de placas cerâmicas devido às suas vantagens quando comparada com as argamassas dosadas em obras. As vantagens no uso da argamassa colante industrializada são:

- Proporcionar melhor resistência de aderência;
- Sua retração não provoca tensões nas placas cerâmicas;
- Permitir a utilização de técnicas de assentamento de grande produtividade, mais simples e limpa;
- Apresentar menor custo global, considerando-se o aumento de produtividade;
- Ser compatível com as práticas de regularização da base (emboço e chapisco).

As argamassas colantes industrializadas são compostas por cimento Portland, grãos inertes de granulométrica fina e resinas orgânicas. As resinas são adicionadas para garantir à

argamassa colante algumas propriedades como: retenção de água, melhoria em sua plasticidade e aumento de extensão de aderência.

Para que a argamassa colante industrializada usada no revestimento cerâmico possa cumprir as suas funções e apresentar um desempenho adequado em face de condição de uso, são necessárias as seguintes propriedades:

- capacidade de retenção de água;
- tempo em aberto;
- deslizamento;
- resistência de aderência à tração simples;
- trabalhabilidade; e
- plasticidade.

Para Medeiros e Sabbatini (1999), a principal propriedade que diferencia as argamassas colantes industrializadas é a sua capacidade de retenção de água. Esta propriedade é muito importante porque permite que o material seja aplicado em camada fina, sem perder para a base ou para o ambiente a quantidade de água necessária para a hidratação do cimento Portland existente na composição da argamassa colante industrializada.

Póvoas *et al.* (2002) comentam que a propriedade tempo em aberto é considerado um dos principais requisitos de desempenho da argamassa colante industrializada. Um dos fatores mais importantes que o influencia é a perda de água. Esta perda ocorre tanto por sucção pela base quanto por evaporação para o meio ambiente e tende a diminuir progressivamente a resistência de aderência do revestimento cerâmico. Convencionou-se que o tempo em aberto ideal é aquele que irá proporcionar uma resistência de aderência do sistema de revestimento de 0,5MPa.

Silva e Cincotto (2004) consideram a propriedade de deslizamento como sendo a deformação dos cordões frescos da argamassa colante, aplicada sobre uma superfície vertical ou inclinada, pela ação do peso da placa cerâmica, sendo esta uma propriedade reológica da argamassa colante. Haverá o deslizamento da placa cerâmica caso a resistência ao cisalhamento da argamassa colante seja menor que a tensão de cisalhamento gerada pelo

peso da placa cerâmica. Para o ensaio de deslizamento, é utilizada a norma ABNT NBR 14085:2005 – "Argamassa Colante Industrializada para Assentamento e Placas de cerâmica – Determinação do deslizamento".

A propriedade resistência de aderência à tração simples representa a tensão máxima suportada por um corpo de prova quando submetido ao esforço normal de tração simples. Temoche-Esquivel *et al.* (2005) concluem que os revestimentos cerâmicos de fachada no país, na sua grande maioria, são aplicados pelo método denominado aderido, pelo qual devem apresentar, em termos de desempenho, uma adequada resistência de aderência à base; proporcionar condição adequada de estanqueidade da parede; capacidade de acompanhar as deformações da estrutura sem apresentar fissuração visível que comprometa suas demais propriedades (estanqueidade e estética, por exemplo); e, resistir a repetidos ciclos de gradientes de tensão originados por gradientes térmicos e de umidade. Além disso, a norma ABNT NBR 14084:2005 - "Argamassa Colante Industrializada para Assentamento e Placas de Cerâmica – Determinação da Resistência de Aderência" descreve o ensaio de resistência de aderência à tração.

A trabalhabilidade é a propriedade mais importante da argamassa colante no estado plástico e essencial para garantir as características desejáveis no estado endurecido. É uma propriedade de complexa definição e de difícil mensuração que depende dos materiais, da composição, do preparo, da mão de obra, da umidade relativa, da temperatura. A trabalhabilidade pode ser medida através do ensaio de consistência que fixa limites para permitir adequada trabalhabilidade, compatível com as ferramentas de trabalho. É uma propriedade de avaliação qualitativa.

Para argamassas colantes industrializadas existem algumas normas internacionais que especificam ensaios exigidos para algumas propriedades. Entretanto, no Brasil não há normas equivalentes que referenciam essas propriedades para as argamassas colantes industrializadas. As normas internacionais a que nos referimos são BSI (*British Standards Institution*) e UEAtc (*Union Europea para la Idoneidad Técnica de la Construcción*) que especificam ensaios para algumas propriedades como:

 Determinação da resistência ao crescimento de fungos - A BSI é a única que apresenta a exigência de determinação da resistência ao crescimento de fungos;

- Determinação da resistência de aderência por cisalhamento Apenas a BSI considera a resistência de aderência por cisalhamento como um método de ensaio para as argamassas à base de cimento;
- Determinação da ajustabilidade Esta determinação só é tratada pela norma BSI e representa o máximo intervalo de tempo em que o revestimento cerâmico pode ser ajustado sobre a argamassa colante estendida em cordões sem que haja uma perda na resistência de aderência:
- Determinação da resistência à deformação excessiva A BSI é a única que apresenta o método de ensaio para a determinação da resistência ao desenvolvimento de deformação excessiva;
- Resistência ao impacto É um método de ensaio que apenas a UEAtc recomenda.

Na ABNT NBR 14081:2012, as argamassas colantes industrializadas são classificadas em três tipos específicos: ACI, ACII e ACIII de acordo com suas características e critérios de desempenho, conforme apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classificação das argamassas colantes - ABNT NBR 14.081:2012

	3	8				
Propriedades	Métodos de Ensaio	Unidade	AC-I	AC-II	AC-III	AC-E
Tempo em aberto	NBR 14083	(min)	≥ 15	≥ 20	≥ 20	
Resistência de aderência a 28 dias		(MPa)				Argamassa do tipo I, II ou III,
- Cura normal - Cura	NBR 14084		≥ 0,5	\geq 0,5	≥1,0	com tempo em aberto estendido
submersa em água			≥ 0,5	≥ 0,5	≥1,0	em, no mínimo, 10 min do
- Cura em estufa			-	≥ 0,5	≥1,0	especificado nesta tabela
Deslizamento ¹	NBR 14085	(mm)	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5	

¹ O ensaio de deslizamento não é necessário para argamassa utilizada em aplicações com revestimento horizontal

 AC-I – Interior: Argamassa com característica de resistência às solicitações mecânicas e termos-higrométricos típicas de revestimento interno, com exceção daqueles revestimentos aplicados em saunas, churrasqueiras, estufas e outros revestimentos especiais;

- AC-II Exterior: Argamassa com características de adesividade que permite absorver os esforços existentes em revestimento de pisos e paredes externas decorrentes de ciclos de flutuação térmica e higrométrica, da ação de chuva e/ou vento, da ação de cargas como as decorrentes do movimento de pedestre em áreas públicas e de máquinas ou equipamentos leves sobre rodízios não metálicos;
- AC-III Alta Resistência: Argamassa que apresenta propriedades de modo a resistir
 a altas tensões de cisalhamento nas interfaces substrato/adesivo e placas
 cerâmica/adesivo, juntamente com uma aderência superior entre as interfaces em
 relação às argamassas dos tipos I e II que são especialmente indicadas para uso em
 saunas, piscinas, estufas e ambientes similares;
- AC-E Especial: Argamassa que atende aos requisitos descritos na Tabela 3.1, similar ao tipo I, II e III, com tempo em aberto estendido.

A argamassa colante industrializada é constituída, basicamente, pelos seguintes materiais:

- Cimento Portland;
- Agregados minerais a areia recomendada deve possuir granulometria e formas dos grãos controladas. O diâmetro deve apresentar dimensão máxima de 0.5mm. A forma do grão recomendada para a argamassa colante costuma ser liso e arredondado, proporcionando maior trabalhabilidade. A distribuição granulométrica é uma preocupação e alguns fabricantes de argamassa complementam a granulometria com pó calcário (Póvoas e John, 1999);
- Aditivos utilizam-se as resinas sintéticas orgânicas nas quais destacam-se as celulósicas e os polímeros vinílicos, acrílicos e estireno-butadienos (Medeiros e Sabbatini, 1999).

Os aditivos são matérias-primas importantes para as propriedades das argamassas colantes industrializadas, pois melhoram sua capacidade de aderência e retenção de água, permitindo a adequação do tempo em aberto. Entre estes agentes destacam-se os hidróxietil celulose (HEC) e metil-hidróxietil celulose (MHEC), como sendo os dois mais empregados nas argamassas adesivas, tendo-se ainda o PVAc (policacetato de vinila) (Medeiros e Sabbatini, 1999).

O HEC é um polímero de celulose natural modificada produzido pela eterificação parcial de alguns grupos hidroxial da celulose, como a álcali celulose que reage com o óxido de etileno para a formação do HEC. O HEC tem como principal propriedade a retenção de água e aumenta a plasticidade e a coesão da argamassa evitando o deslizamento da placa cerâmica, incorpora ar deixando a argamassa mais trabalhável, e retarda os tempos de pega que ampliam o tempo em aberto (Póvoas e John, 1999).

O PVAc é um polímero sintético e insolúvel derivado da polimerização do vinil acetato, e somente torna-se solúvel quando sofre hidrólise, permitindo a formação do PVA (poli(vinil álcool)). Este aditivo aumenta a resistência à compressão, à flexão e a aderência, além de reduzir a permeabilidade da argamassa. O PVAc envolve os grãos do cimento tornando a argamassa mais densa e homogênea, aumentando sua flexibilidade e plasticidade, e pelo fato de possuir protetor coloidal em usa composição, retém um pouco a água, retardando a formação da película (Póvoas e John, 1999).

3.1.4 Camada de acabamento final

Segundo Ribeiro (2006), entende-se por camada de acabamento final aquela constituída pelas placas cerâmicas e pelas juntas entre as placas, preenchidas por rejunte de revestimento. Por ser encontrada diretamente exposta à ação das intempéries, é a camada do sistema mais solicitada pela ação da temperatura e da umidade. Assim, tanto as placas cerâmicas quanto a argamassa de rejunte devem ser dotadas de características e propriedades físicas, químicas e mecânicas que permitam à camada de acabamento cumprir suas funções.

De acordo com a ANFACER (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos), as placas cerâmicas, quando comparadas com outros tipos de revestimento apresentam inúmeras vantagens, tais como alta resistência, durabilidade, beleza e diversidade, e um produto antialérgico, precificação variada, versatilidade, fácil limpeza, fácil colocação, alta compatibilidade, não propagam chamas e disponibilidade.

O revestimento cerâmico constitui-se de um sistema em que a qualidade de seu funcionamento depende basicamente da qualidade da base ou substrato; da qualidade do chapisco; da qualidade da placa em função do uso; da correta especificação de todo o sistema; e do correto assentamento. Este último envolve a correta preparação e aplicação da

argamassa de rejunte e mão-de-obra adequadamente qualificada. Para um bom resultado, os elementos citados devem manter os níveis de qualidade mínimos exigidos em norma (Gastaldini e Sichieri, 2010).

De acordo com Chagas (2009), as principais solicitações sobre as placas cerâmicas do sistema de revestimento estão relacionadas com as movimentações higroscópicas mais conhecidas por expansão por umidade (EPU), decorrente da absorção de água da placa cerâmica oriunda das chuvas e da umidade relativa do ar, e com as movimentações geradas pela variação da temperatura. A maioria das placas cerâmicas, esmaltadas ou não, possuem expansão por umidade o que não contribui para problemas quando as placas são assentadas corretamente. Porém, com assentamento insatisfatório ou em certas condições climáticas, a expansão por umidade acima de 0,06% ou seja, 0,6mm/m, podem contribuir para os problemas de patologia.

Outro aspecto importante que deve ser levado em conta é a dimensão das placas cerâmicas a fim de diminuir o seu peso próprio, bem como os percentuais de dilatação térmica. Segundo Cichinelli *et al.* (2006), embora qualquer tamanho de placa cerâmica seja suscetível ao problema de descolamento, quanto menor a peça cerâmica, mais estável será o sistema de revestimento cerâmico, tendo em vista a maior quantidade de juntas existentes para dissipar as tensões internas do revestimento cerâmico. Entretanto, quanto maiores forem as placas cerâmicas, maiores serão os riscos de desplacamento, sobretudo, em virtude da diminuição da quantidade de juntas de assentamento para dissipar as tensões internas e externas do revestimento cerâmico.

Por outro lado, as placas cerâmicas apresentam fratura frágil, isto é, elas apresentam pouca ou nenhuma deformação plástica considerável, e sua resistência ao impacto é bastante reduzida, ou seja, baixa tenacidade à fratura, o que impede que elas sejam mais empregadas para fins estruturais. Esta situação é ainda agravada pela elevada variabilidade da resistência à fratura das placas cerâmicas de um mesmo lote, de maneira que a resistência máxima de algumas placas seja o dobro da outra (Zanotto e Migliore, 1991). Isso decorre da falta de controle de qualidade na fabricação das placas cerâmicas.

Com relação às juntas entre as placas, existem diferentes tipos de juntas para o sistema de revestimento cerâmico, tais como a junta de assentamento e a junta de movimentação. A

junta de assentamento é usada para permitir a movimentação unitária das placas cerâmicas, garantir a estanqueidade e permitir o alívio das tensões provenientes das variações de temperatura sobre o sistema de revestimento cerâmico. E, a junta de movimentação é utilizada para aliviar as tensões de movimentação da cerâmica e, principalmente, de todas as camadas que envolvem a estrutura do sistema de revestimento cerâmico. Essas tensões são provocadas pela deformação da estrutura ou decorrente da variação da temperatura ou de outras ações de intempéries, como mostrado na Figura 1.1.

Hoje em dia, tem-se falado muito das argamassas industrializadas. Entretanto, as argamassas de rejuntamento não tem recebido a devida atenção quanto à sua importância funcional, tanto pelos usuários quanto pelos pesquisadores, que se atém apenas às argamassas colantes de revestimento e assentamento. De acordo com Junginger (2003), o rejunte é um componente do revestimento cerâmico tão essencial quanto qualquer outro para o desempenho do conjunto. Brito *et al.* (2003) relatam que a durabilidade do sistema de revestimento cerâmico não é eterna e está, diretamente, ligada ao estado de degradação do rejunte, bem como da sua concepção, execução e manutenção.

De acordo com a norma da ABNT NBR 14992:2003, as argamassas de rejuntes são misturas industrializadas de cimento Portland e outros componentes homogêneos e uniformes para aplicação nas juntas de rejunte de assentamento das placas cerâmicas, classificadas segundo o ambiente de aplicação e requisitos mínimos especificados apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Tipos de argamassa de rejunte e requisitos mínimos. (ABNT NBR 14992:2003)

Anexos	Métodos/propriedades	Unidade	Idade de ensaio	Tipo I	Tipo II
В	Retenção de água	(mm)	10 min	≤ 75	≤ 65
C	Variação dimensional	(mm/m)	7 dias	≤ 2,00	≤ 2,00
D	Resistência à compressão	(MPa)	14 dias	\geq 8,0	≥ 10,0
E	Resistência à tração na flexão	(MPa)	7 dias	≥ 2,0	≥ 3,0
${f F}$	Absorção de água por capilaridade aos 300 min	(g/cm²)	28 dias	≤ 0,60	≤ 0,30
G	Permeabilidade aos 240 min	(cm³)	28 dias	\leq 2,0	≤ 1,0

- Tipo I Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas para uso em ambientes internos e externos, desde que sejam observadas as seguintes condições: aplicação restrita aos locais de trânsitos não intensos de pedestres; aplicação restrita a placas cerâmicas com absorção de água acima de 3% segundo a ABNT NBR 13817:1997; e aplicação em ambientes externos, piso ou parede, desde que não excedam 20 m² e 18 m², respectivamente, limites a partir dos quais são exigidas as juntas de movimentação de acordo com a ABNT NBR 13753:1997 e ABNT NBR 13755:1997;
- Tipo II Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas, para uso em ambientes internos e externos, deste que sejam observadas as seguintes condições: todas as condições da argamassa do Tipo I; aplicação em locais de trânsitos intensos de pedestres; aplicação em placas cerâmicas com absorção de água inferior a 3% segundo a ABNT NBR 13817:1997; e ambientes internos e externos com presença de água estancada, exemplo piscina, espelho d'água e etc.

A junta de movimentação, conforme apresentado na Figura 3.2, é formada por um material de enchimento, como o tarugo de polietileno de 15mm, e por um selante. A ABNT NBR 13755:1996, que se refere ao revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante, recomenda que os espaçamentos necessários para a execução das juntas de movimentações horizontais sejam de, no máximo, a cada 3m e para as juntas de movimentações verticais seja de, no máximo, a cada 6m, e sempre que possível, as juntas de movimentações deverão ser coincidentes com as posições de encunhamento das alvenarias com a estrutura.

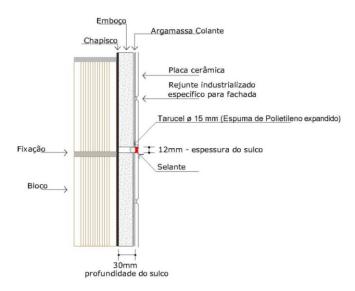


Figura 3.2 - Detalhe da junta de movimentação. ABNT NBR 13755:1996. (Costa e Silva, 2014)

Com relação à execução de juntas de movimentação em revestimentos cerâmicos externos, a Sociedade Francesa de Cerâmica recomenda sua execução de, no máximo, a cada 6m e/ou 32m². Enquanto, as especificações americanas para cerâmica indicam que as juntas devem ser executadas até a argamassa de emboço, sendo de 12mm a cada 5m no máximo. Por fim, os trabalhos australianos sugerem a execução de juntas de movimentação com uma distância capaz de absorver todas as tensões e deformações diferenciais, com abertura superior a 12mm, a cada 6m, de modo a minimizar o efeito diferencial dos movimentos da estrutura e alvenaria.

3.2 TENSÕES ATUANDO NO SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO SOB O EFEITO DA TEMPERATURA

O uso do sistema de revestimento cerâmico, sem o conhecimento adequado do seu comportamento mecânico de deformações e de tensões, pode favorecer o surgimento de patologias, que podem causar sérios danos para o revestimento ou, até mesmo, em caso de desplacamento, e podem causar graves acidentes.

Segundo Fiorito (1994), todas as camadas de um sistema de revestimento cerâmico estão ligadas entre si, existindo maior ou menor resistência de aderência nas suas interfaces, de forma que essas camadas se comportam solidariamente entre si, ou seja, se uma camada falhar pode comprometer todo o conjunto do sistema de revestimento cerâmico. A

deformação de qualquer uma das camadas devido a causas endógenas ou esforços externos resultará em tensões atuando sobre cada camada. As deformações podem tanto se compensar, como também se somar, gerando neste caso tensões máximas que, se forem superiores à resistência mecânica do material ou das interfaces entre as camadas, podem levar o sistema de revestimento cerâmico ao colapso.

As deformações que podem vir a comprometer o sistema de revestimento cerâmico, que podem ser provocadas por algumas patologias como, por exemplo, a retração da argamassa que liga os elementos das alvenarias; a retração da argamassa utilizada no emboço ou no contrapiso; as deformações lentas do concreto da estrutura atuando sobre o sistema de revestimento cerâmico; o recalque das fundações; as deformações originadas pela variação da umidade relativa do ar atuando sobre as argamassas colantes endurecidas; a dilatação higroscópica dos elementos cerâmicos e as deformações originadas pela atuação de cargas acidentais e as originadas por variações térmicas atuando na cerâmica e nas argamassas colantes.

Para analisar o efeito da tensão de tração sobre o sistema de revestimento cerâmico, consideramos o trecho de revestimento da Figura 3.3, sob uma temperatura ambiente inicial T_0 e recebendo um aumento gradativo da temperatura ($T_1 > T_0$). A despeito disso, conforme apresentado na Figura 3.4, as placas cerâmicas tendem a se afastar umas das outras de maneira não uniforme, devido ao coeficiente de dilatação térmica e ao módulo de elasticidade das placas não serem iguais, fazendo com que as juntas se abram, dando origem ao processo de cisalhamento simples entre a base das peças (tardoz) e a argamassa colante. Se a resistência de aderência da interface da camada regularizadora emboço/argamassa colante/cerâmica for inferior ao cisalhamento (τ), as placas da base se soltarão da camada regularizadora, ocorrendo o desplacamento do revestimento cerâmico, como mostrado na Figura 3.4. Em seguida ao aumento gradativo da temperatura ($T_1 > T_0$), havendo, por exemplo, uma queda gradual de temperatura ($T_2 < T_0$), ocorre um encurtamento da base fazendo com que as peças soltas tomem a forma de um "V" invertido, como apresentado na Figura 3.5 (Fiorito, 1994).

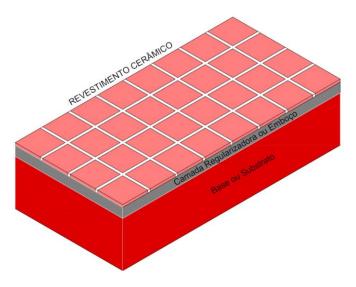


Figura 3.3 - Sistema de revestimento cerâmico na temperatura inicial T_0 .

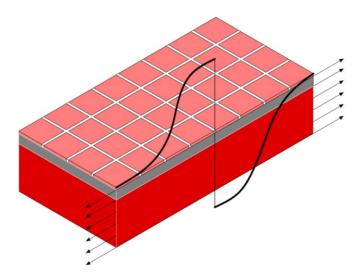


Figura 3.4 - Processo de cisalhamento no sistema de revestimento cerâmico $T_1 \!\!>\!\! T_0.$

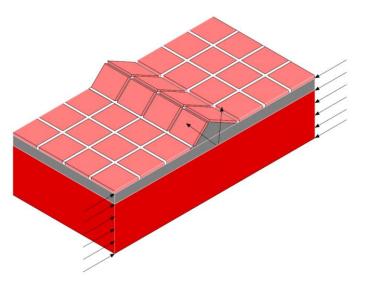


Figura 3.5 - Sistema de revestimento cerâmico após queda de temperatura $T_2 < T_0$.

A tensão de compressão no sistema de revestimento cerâmico pode ser causada pela retração da camada de emboço quando essa base de argamassa, considerada isoladamente, retrai nas extremidades do sistema causando tensões de cisalhamento atuando na interface camada de emboço/argamassa colante/cerâmica. Consequentemente, a distância inicial "d" da placa diminui para "d₁", como mostrado na Figura 3.6 (Fiorito, 1994).

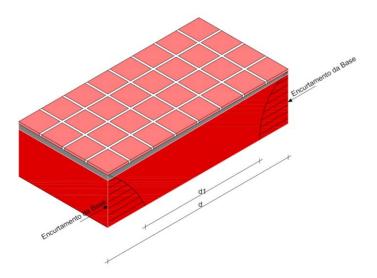


Figura 3.6 - Tensão de compressão atuando no sistema de revestimento cerâmico.

Já na Figura 3.7 mostra a ação das forças "p" e "q" geradas em função da tensão de compressão do sistema mostrada na Figura 3.6. A força "p" é a componente vertical de tração

que tende a arrancar o revestimento de sua base. Enquanto, a força "q" representa a resistência de aderência que se opõe à força "p". Quando a aderência for maior que a componente vertical de tração (q > p), haverá tensão de compressão, mas o revestimento permanece estável (Fiorito, 1994).

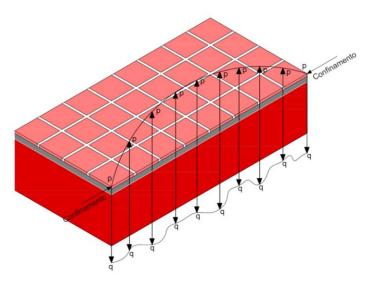


Figura 3.7 - Representação das forças "p" e "q" atuando no revestimento cerâmico.

Na Figura 3.8 mostra que as peças cerâmicas se soltam da base quando a força "p" é maior ou igual à resistência de aderência "q", ocorrendo assim o abaulamento das placas cerâmicas e o seu posterior colapso como mostrado na Figura 3.9 (Fiorito, 1994).

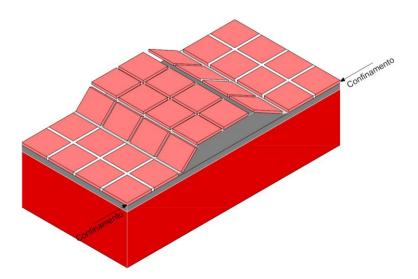


Figura 3.8 - Sistema de revestimento cerâmico entrando em colapso.

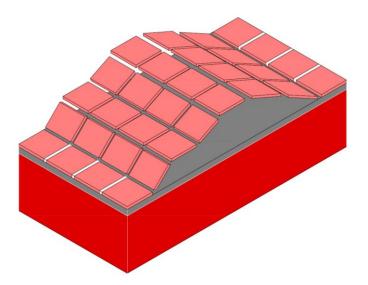


Figura 3.9 - Colapso do sistema de revestimento cerâmico.

As tensões térmicas são uma das principais responsáveis por problemas de desplacamento de placas cerâmicas, pois provocam movimentos cíclicos de expansão e contração que podem prejudicar a aderência nas interfaces do sistema de revestimento cerâmico por efeito da fadiga.

Como exposto, o desplacamento do sistema de revestimento cerâmico, provocado pelas tensões de tração e compressão atuantes sobre o sistema, pode causar prejuízos econômicos expressivos e risco de acidentes, se não tomarmos certos cuidados na logística da execução do sistema de revestimento cerâmico. Entre esses cuidados e procedimentos, podemos destacar:

- Conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos diferentes materiais que formam o sistema de revestimento;
- Controle de cura;
- Aplicação correta das juntas de movimentação e de assentamento entre as peças cerâmicas para limitar as tensões térmicas ou de outras origens, para melhorar a estabilidade dos revestimentos.
- Mão-de-obra treinada e especializada no domínio de execução do revestimento cerâmico.

Fiorito (1994) ressalta que ainda a obrigatoriedade de planejamento prévio das juntas na execução dos revestimentos, levando em consideração os tipos de juntas, posicionamento,

larguras e materiais que devem ser usados como rejunte, e a maneira de se evitar a ocorrência desta patologia estão diretamente ligados ao controle de execução do rejuntamento/preenchimento das juntas de movimentação, bem como à escolha dos materiais de preenchimento que atendam aos requisitos de projeto.

3.3 ESTUDO DE FADIGA DOS MATERIAIS

A fadiga do material é um fenômeno físico caracterizado por um processo onde ocorrem mudanças progressivas e localizadas de natureza irreversível no material submetido a tensões ou deformações flutuantes, que podem resultar em fissuras ou na ruptura completa do material (ASTM, E-1823-96). Essa deterioração progressiva e irreversível do material é observada após a aplicação de certo número de ciclos de carregamento. Geralmente, esses ciclos são repetidos de forma contínua ao longo do tempo, sem causar a falha do material durante a aplicação dos primeiros ciclos de carga, pois o nível desse carregamento não é elevado o suficiente para causar a falha do material (ABNT NBR 6118:2014 Anexo C). Segundo Meggiolaro e Castro (2003), a fadiga mecânica representa a degradação das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento variável.

Os estudos efetuados por *Wöhler* entre 1858 e 1860 foram realizados em componentes estruturais sujeitos a flexão, a torção e a solicitações de carregamentos axiais. Estes estudos permitiram concluir que a vida útil à fadiga aumentava com a diminuição do campo de tensão aplicada, de forma que abaixo de um determinado valor de tensão o componente parecia ter vida infinita. Por outro lado, constatou-se que a vida à fadiga era drasticamente reduzida pela presença de entalhes. Destes estudos resultou a caracterização do comportamento à fadiga em termos de amplitude de tensão-vida útil à fadiga denominada por curva S-N, também, conhecida por curva de *Wöhler*, representada por um gráfico onde as tensões cíclicas são marcadas em função do número de ciclos de carregamento até a ruptura da peça por fadiga. As curvas de *Wöhler* para o teste de fadiga, não definem os tempos para o surgimento e para a propagação da fissura. Com isso, torna-se difícil o estudo do comportamento de estruturas que apresentam fissuras, assim como determinar a influência de suas dimensões na vida útil em fadiga (Ávila, 2005).

Na Figura 3.10 mostramos um carregamento cíclico de tensões regulares (amplitude constante) com a tensão máxima ($S_{máx}$) e a tensão mínima (S_{min}) sendo aplicadas durante um determinado intervalo de tempo (Magnabosco, 2000).

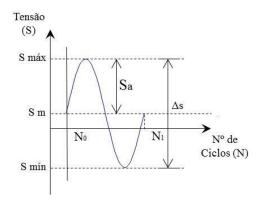


Figura 3.10 - Dados utilizados para os ensaios de fadiga. (Magnabosco, 2000).

A amplitude da tensão alternada (S_a) é dada pela diferença entre a tensão máxima ($S_{m\acute{a}x}$) e a tensão mínima (S_{min}) dividido por 2, conforme mostrado na Equação 3.1.

$$S_a = \left(\frac{S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{n}n}}{2}\right) \tag{3.1}$$

A relação entre a variação da tensão (ΔS) e a tensão alternada (S_a) é dada pela Equação 3.2.

$$\Delta S = 2S_a \tag{3.2}$$

A tensão média (S_m) das tensões máxima ($S_{m\acute{a}x}$) e mínima (S_{min}) é dada pela Equação 3.3.

$$S_m = \left(\frac{S_{m\acute{a}x} + S_{m\acute{n}}}{2}\right) \tag{3.3}$$

A relação entre a tensão mínima (S_{\min}) e a tensão máxima ($S_{m\acute{a}x}$) representa a razão de tensão em fadiga (R) e é demonstrada na Equação 3.4.

$$R = \frac{S_{min}}{S_{min}} \tag{3.4}$$

O valor de R indica o tipo de carregamento ao qual o material está submetido. Se R=0 significa que a solicitação é repetida e o ciclo varia de carga nula para carga de tração. Se R=-1 significa que houve a completa inversão de tração para compressão e, nesse caso, a tensão média é nula ($S_m=0$) e o carregamento é totalmente reverso. E, se R>0 então significa que houve somente carga de tração. Nesse trabalho, utilizamos um regime reverso onde a tensão média é nula e a solicitação é R=-1 e, ainda, R=0. Isto ocorre devido ao tipo de ensaio utilizado.

A resistência à fadiga está relacionada a diversos fatores, que variam de material para material, tais como: concentrações de tensões; rugosidade da superfície; frequência de carregamento; histórico do carregamento; temperatura e condições ambientais. Cada um desses fatores tem requerido estudos especiais por parte de vários pesquisadores.

O estudo da fadiga em sistemas de revestimento cerâmico é um desafio da comunidade científica, pois se trata de um tema pouco abordado na literatura e com poucas referências de pesquisa e sobre a padronização de metodologias de ensaios, por exemplo. Observa-se que não existe, ainda, uma metodologia que possa ser empregada com segurança para o estudo da fadiga em materiais de um sistema de revestimento cerâmico. O que há são metodologias para o estudo de fadiga em materiais como o aço e o concreto, entre outros materiais.

Os sistemas de revestimento cerâmico considerados neste trabalho são constituídos de materiais com comportamento frágil, tais como: substrato em concreto ou em alvenaria, emboço em argamassa industrializada, argamassa colante, rejunte e cerâmica. Entretanto, o material frágil mais estudado na engenharia por sua versatilidade é o concreto - seja ele concreto puro ou armado ou, ainda, protendido.

Os materiais dúcteis como o aço, geralmente, seguem uma curva de resistência típica chamada curva de *Von Mises* (Shigley e Mischke, 2004). Nessa curva observa-se que a resistência para a compressão pura é igual à resistência para a tração pura. A Figura 3.11(a)

apresenta uma curva de *Von Mises* para um estado plano de tensão onde σ_1 e σ_2 são as tensões principais e f_y é a tensão de escoamento ou a tensão de ruptura igual à tração ou à compressão. E, os materiais frágeis, geralmente, seguem a curva de *Coulomb-Mohr* (Shigley e Mischke, 2004). Essa curva destaca uma diferenciação de resistência quando o material está sob tração pura (f_{tk}) ou compressão pura (f_{ck}). Para as curvas de ruptura definidas em termos de tensão principal, essa aproximação é uma variante do Teorema da Tensão Normal Máxima de Rankine (Colins, 1993).

Num estado plano de tensão com tensões normais nas direções x e y e de cisalhamento (σ_x ; σ_y e σ_{xy}), as tensões principais (Timoshenko, 1961) são determinadas pelas Equações 3.5 e Equação 3.6.

$$\sigma_{1} = \frac{\sigma_{x} + \sigma_{y}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x} - \sigma_{y}}{2}\right)^{2} + \sigma_{xy}^{2}}$$
(3.5)

e

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2}$$
 (3.6)

Adotou-se nesta pesquisa o critério de *Coulomb-Mohr* para materiais frágeis conforme mostra a Figura 3.11(b). Segundo Kupfer *et al.* (1969) e Willam e Warnke (1974), outros critérios ou curvas associadas podem ser, também, adotados para uma revisão (Babu *et al.*, 2005).

A partir do momento que se define um critério ou uma curva de ruptura a ser adotada, então se um ponto num estado plano de tensão apresenta componentes de tensão principal (σ_1 , σ_2) que caem dentro ou sobre as curvas de resistência adotadas, conclui-se que não há risco de colapso da estrutura. Entretanto, se esses componentes de tensão principal (σ_1 , σ_2) caírem fora das curvas, então há risco de colapso mostrado na Figura 3.11.

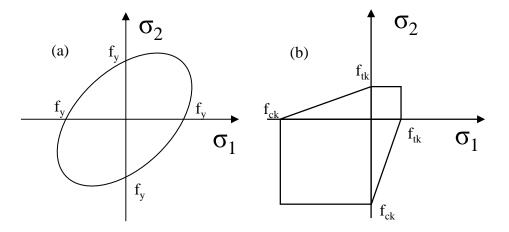


Figura 3.11 – (a) Curva de *Von Mises* (b) Curva de *Coulomb-Mohr* para materiais frágeis.

A curva de resistência para materiais dúcteis como o aço se apresenta com a diminuição gradativa da resistência. Similarmente, pode-se adotar esse mesmo comportamento de curva de resistência para a argamassa colante (materiais frágeis). Nesse caso, a curva de resistência deve ser uma curva apropriada para materiais frágeis, pois cada material dúctil ou frágil segue determinadas curvas características de resistência. Para a fadiga, a diminuição gradativa da resistência, com o passar dos ciclos de carga, pode ser representada pela Figura 3.12, que ilustra esse comportamento de encolhimento da curva de resistência para materiais frágeis, como o concreto, e adotado nesta pesquisa para a argamassa colante.

Ainda, na Figura 3.12 considera-se que haverá ruptura ou não de um material frágil, respectivamente, se for observado que o ponto (σ_1, σ_2) cai dentro ou fora das curvas de resistência para um determinado número de ciclos de carga "n=i". Quando há tensões combinadas, por exemplo, estados de tensão bi ou tridimensional, com componentes normais e de cisalhamento.

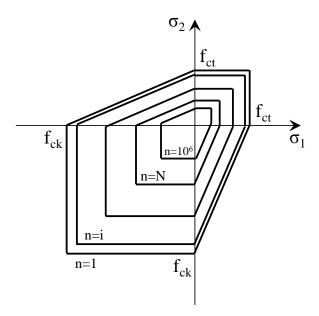


Figura 3.12 - Curvas de resistência para material frágil durante os ciclos de carga.

Ao ser definido um critério de ruptura para a fadiga e usando as curvas S-N de *Wöhler* de forma experimental, utilizando-se testes com tensões alternadas à tração e à compressão, pode-se determinar como ocorre à diminuição das resistências à tração (f_{tk}) e à compressão (f_{ck}) com o passar dos ciclos de carga. Entretanto, observa-se que, para materiais frágeis como as argamassas usadas em revestimentos, estes testes são ainda escassos. Muitos pesquisadores têm feito levantamento da curva S-N para o concreto sob tração (Lee e Barr, 2004) por ser um material de emprego estrutural.

Ressalta-se, entretanto, que na UnB há uma linha que contempla o levantamento de tais curvas S-N para os materiais dos sistemas de revestimento. Entretanto, as pesquisas de fadiga no concreto servem de base para as pesquisas sobre fadiga nas argamassas e materiais usados nos sistemas de revestimento cerâmico. Cervo (2004) apresenta uma ampla revisão das curvas de fadiga levantadas para o concreto, com destaque para o artigo de Tepfers e Kutti (1979), onde um modelo de fadiga à compressão foi desenvolvido. Além disso, os próprios autores verificaram, por meio de análise estatística, que a mesma expressão poderia ser aplicada para ensaios de fadiga à tração. Ou seja, a mesma expressão usada para fadiga à compressão do concreto poderia ser aplicada para ensaios de fadiga à tração do concreto. A expressão obtida por Tepfers e Kutti (1979) e citada por Cervo (2004) está apresentada na Equação 3.7.

$$\frac{S}{f} = 1 - 0.0685(1 - R)\log N \tag{3.7}$$

Na Equação 3.7, S é a tensão máxima alternada; f é a resistência estática à compressão axial (f_{ck}) ou à tração axial (f_{tk}) do concreto; N é o número de ciclos à fadiga; e R é a relação definida na Equação 3.4 entre a tensão mínima e a tensão máxima aplicadas no ensaio. Observa-se que para R=0 (tensão $\sigma_{min}=0$), o valor da tensão alternada S, para um ciclo (N=1), equivale a um teste de compressão ou de tração axial, ou seja, estático, e assume os valores $S=f_{ck}$ ou $S=f_{tk}$, a depender se a peça de concreto está sob teste de compressão ou de tração axial, respectivamente.

Uchôa (2007) tomou como base no seu trabalho que: (a) o corpo se rompe sob tensão última (à tração f_{tk} ou à compressão f_{ck}) em apenas um ciclo (N=1); (b) para materiais frágeis (como o concreto, e aqui estendido para argamassa colante industrializada) deduzida uma curva de fadiga com ensaios à compressão e à tração, pode-se passar para uma curva de fadiga à compressão e à tração (e vice-versa); (c) para diferentes resistências (à tração e à compressão), uma curva de fadiga difere da outra. Portanto, as curvas a serem adotadas nesta pesquisa para as argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII estão representadas na Figura 3.13.

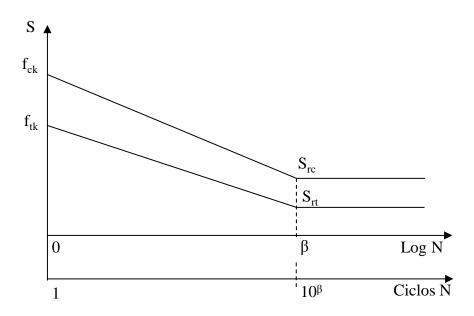


Figura 3.13 – Curva S-N adotada para argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

3.3.1 Processo de propagação da fadiga nos materiais

O processo de propagação da fadiga nos materiais é dividido em quatro fases, conforme apresentado na Figura 3.14, e inicia-se pela nucleação mais ou menos lenta de trincas de fadiga em componentes estruturais, quando submetidos a tensões dinâmicas, que podem levar a ruptura por fadiga. Após o período de iniciação da trinca caracterizado pela nucleação e crescimento microscópico das fissuras, ocorre o crescimento macroscópico que constitui o período de propagação da trinca, podendo conduzir a ruptura final. Vale ressaltar que o início e o final de cada período (iniciação e propagação) não são facilmente definidos, a exceção da ruptura final do material ou estrutura.

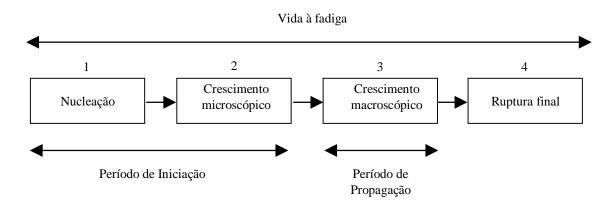


Figura 3.14 - Processo de propagação da fadiga. (Uchôa, 2007)

Nas duas primeiras fases, inicialmente, o acúmulo do dano em nível microscópico ocorre com a nucleação das microfissuras, que se estendem durante o período de crescimento e são caracterizadas pelo crescimento do número de trincas, que ainda são pouco profundas quando comparadas com o tamanho da seção. Na terceira fase, partes dessas trincas transformam-se em aberturas macroscópicas que se propagam na direção das regiões de concentrações de tensões gerando uma instável e catastrófica fratura do material. Na quarta fase ocorre à ruptura final, ou seja, o colapso do material ou da estrutura.

A fadiga define-se, assim, pelo número de ciclos de aplicação da carga até a ruptura N_t , englobando o período de iniciação N_i e o período de propagação N_p , conforme a Equação 3.8:

$$N_t = N_i + N_p \tag{3.8}$$

Cervo (2004) também enfatiza que o processo de fadiga causa o enfraquecimento gradual das peças estruturais, e resume o processo de propagação da fissura em três etapas conforme apresentado a seguir:

Etapa 1:

- Iniciação da fissura, quando uma pequena fissura se forma em algum ponto de alta concentração de tensões; ou
- Descontinuidades pré-existentes, ou seja, microfissuras já existentes no material (devido à existência de falhas no concreto) previamente ao processo de fadiga; ou
- Os dois fenômenos anteriores ocorrendo simultaneamente.

Etapa 2:

 Propagação da fissura, onde há o avanço de sua frente em incrementos a cada ciclo de tensões, devido à existência de zonas de concentração de tensões; e

Etapa 3:

 Ruptura final, que ocorre muito rapidamente, uma vez que a fissura em avanço tenha atingido uma abertura crítica.

No processo de propagação de fadiga, as trincas de fadiga iniciam-se, geralmente, num ponto de concentração de tensões à superfície, onde o estado de tensões é particularmente elevado, propagando-se na direção perpendicular à direção da tensão principal e verificando-se a ruptura instável do tipo frágil ou dúctil quando a seção resistente do material se torna insuficiente para suportar a tensão aplicada.

Tem sido observado que, a resistência à fadiga está diretamente relacionada ao valor das variações de tensões máximas e mínimas, " ΔS ", aplicadas no material, em vez do valor máximo das tensões, " $S_{máx}$ ". Alguns pesquisadores têm verificado que, baixos níveis de carregamento também podem levar a estrutura ao colapso por fadiga, devido ao elevado número de ciclos aplicados. Contudo, se o valor " ΔS " for inferior ao limite de fadiga, a repetição do carregamento não causará a ruptura do material.

Nesta pesquisa, o estudo de fadiga na argamassa colante industrializada tem influência direta na vida útil das argamassas colantes e, consequentemente, dos revestimentos cerâmicos. O colapso por fadiga gerada por ciclos variáveis de tensões na argamassa colante pode gerar desplacamento no sistema de revestimento cerâmico com consequências graves. Do ponto de vista prático, o estudo de fadiga e o cálculo da vida útil da argamassa e do revestimento, junta competências de três importantes áreas do conhecimento: (1) Teoria da Mecânica da Fratura, com sua fundamentação teórica sobre a distribuição de tensões na vizinhança das trincas; (2) Curva S-N ou curva de *Wöhler*, que é uma forma prática de identificar as resistências de um material diante da ciclagem de tensões, entre outras metodologias, do uso da Mecânica da Fratura; e, (3) Teoria de Acúmulo de Danos que permite avaliar a vida útil dos materiais. Os conceitos fundamentais dessas três competências serão revisados a seguir, para um melhor entendimento da metodologia empregada neste trabalho de análise de fadiga por ciclagem de tensões de origem térmica em argamassas colantes industrializadas.

3.3.1.1 Mecânica da fratura

O estudo da mecânica da fratura dos materiais vem sendo realizado desde a década de 40. Vários pesquisadores têm desenvolvido estudos envolvendo a falha mecânica por ruptura frágil de materiais dúcteis. Irwin, no ano de 1948, introduziu o conceito de energia liberada e, Orowan, em 1952, realizou grande contribuição no desenvolvimento teórico da mecânica da fratura. A mecânica da fratura estuda, além da mecânica das trincas (ou fissuras), outros tipos de falhas estruturais como, por exemplo, a perda da integridade estrutural sem aparecimento das micro-trincas, a perda de estabilidade e a deformação inadmissível.

Os dois principais mecanismos de fratura são chamados fratura por cisalhamento e fratura flexível, sendo este último quando a fratura ocorre na tração e na compressão. Quando uma fissura devido a fadiga do material se desenvolve a um certo tamanho, a fratura final tomará lugar por fratura de cisalhamento e/ou por fratura flexível. Como uma fratura por cisalhamento é, geralmente, associada a materiais com pouca deformação plástica, ela é, também, chamada de fratura frágil. Além disso, o termo fratura frágil é generalizado para todas as fraturas com pouca deformação plástica (Broek, 1988).

Os dois ramos principais da mecânica da fratura são a Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) e a Mecânica da Fratura Elastoplástica (MFEP). As argamassas colantes industrializadas que compõem o sistema de revestimento cerâmico, objeto de estudo deste trabalho, são consideradas materiais frágeis, nos quais podem ocorrer fraturas sem extensa deformação plástica anterior, podendo ser, portanto, um material que pode ser estudado por meio da MFLE.

A. A. Griffith deduziu, em 1920, as equações que determinam a fratura de sólidos com trincas presentes a partir da observação em um experimento de que quando uma trinca é inserida em uma placa de material elástico tensionada, deve haver um equilíbrio entre o decréscimo na energia potencial e o aumento na energia de superfície resultante da presença de uma trinca. Com isso, uma trinca presente cresce a partir do fornecimento de energia de superfície adicional necessária pelo sistema. Essa energia de superfície decorre do não equilíbrio dos átomos vizinhos mais próximos da superfície de um sólido. O primeiro modelo de fratura de um sólido com trinca foi criado pelo engenheiro Inglis. Griffith utilizou a análise de tensões de Inglis, considerando um corpo de prova de dimensões infinitas contendo um furo elíptico sob carga de tração, como apresentado na Figura 3.15, para deduzir as Equações 3.9 e 3.10 de tensão plana e deformação plana, respectivamente.

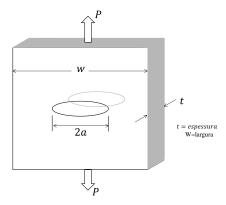


Figura 3.15 - Um corpo de prova com um furo elíptico sob carga de tração. (Griffith, 1920)

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \tag{3.9}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a(1-\nu^2)}}\tag{3.10}$$

Onde:

- E = módulo de elasticidade (Pa)
- γ_s = energia superficial específica (Pa.m)
- a = metade do comprimento da trinca (m)
- ν = coeficiente de Poisson

A Equação 3.11 fornece a tensão plana necessária para propagar uma trinca em um material frágil em função do tamanho da trinca (2a). Como a tensão plana é inversamente proporcional à raiz quadrada do comprimento da trinca, um aumento de quatro vezes no comprimento da trinca irá corresponder a uma redução pela metade na tensão de fratura. Admitindo-se um estado de deformações e espessuras grandes do material em comparação com o comprimento da trinca, temos a Equação 3.11 para a deformação plana.

Entretanto, a teoria de Griffith não leva em conta a deformação plástica sofrida pelo material. Posteriormente, Irwin introduziu o termo relacionado à energia de deformação plástica deduzida na Equação 3.11.

$$\sigma = \sqrt{\frac{E\zeta}{\pi a}} \tag{3.11}$$

Onde ζ é a força de extensão da trinca ou taxa de dissipação de energia de deformação elástica, uma propriedade do material possível de ser obtida em laboratório a qual indica que para um valor crítico (ζ_c) a trinca se propagará rapidamente. E para uma placa finita de largura (w) com uma trinca central de comprimento (2a), a força de extensão da trinca (ζ) para carregamento em condições de tração é dada pela Equação 3.12.

$$\varsigma = \frac{\sigma^2 \cdot w}{E} (1 - v^2) \cdot tg\left(\frac{\pi \cdot a}{w}\right) \tag{3.12}$$

Dessas equações, pode-se observar que a resistência à fratura diminui com o aumento do comprimento da trinca do material.

Portanto, considerando as solicitações de cargas atuando no campo de tensões em uma trinca, serão induzidos três modos básicos de movimentação da trinca correlacionados a um tipo básico de solicitação de carga, conforme apresentados na Figura 3.15. Apesar da premissa de Griffith de que a distribuição de tensão é uniforme pelo corpo do material, exceto nas partes abaixo e acima da trinca que estão livres de tensão, verificou-se que a distribuição real de tensões é não uniforme. Isso porque, a trinca é um forte concentrador de tensão e depende de três fatores: do comprimento da trinca, da geometria do material e do modo de carregamento da tensão, conforme mostrado na Figura 3.16. Além disso, somente a área, imediatamente abaixo e acima da trinca pode ser considerada livre de tensão, pois a carga externa está distribuída uniformemente ao longo de todo o contorno inferior e superior do material, e todo material próximo deste contorno está também carregado.

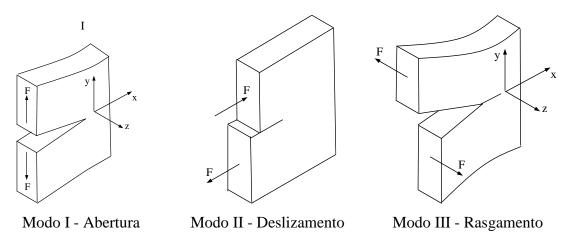


Figura 3.16 - Modos de carregamento básico de uma trinca.

Os modos geométricos de fratura em um estado plano de tensão podem ser apresentados como uma superposição linear de três estados independentes representados pelos Modos I, II e III conforme Figura 3.16. O modo geométrico Modo I representa uma trinca de tração normal e ocorre quando as faces da trinca são separadas. O Modo II representa uma trinca de cisalhamento no plano e ocorre quando há o deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesma e, perpendicularmente, à propagação da trinca. Por fim, o Modo III representa uma trinca de cisalhamento fora do plano – rasgamento e ocorre quando as superfícies da trinca se movem paralelamente em relação à aresta de propagação e relativamente umas às outras. O estudo desses casos tem importância prática, principalmente, o Modo I que é mais encontrado em elementos estruturais e caracterizado pelos menores valores críticos de carga (Pastoukhov e Voorwald, 1995).

Dessa forma, pode-se tratar qualquer trinca assumindo o deslocamento em uma trinca como sendo uma combinação dos três modos, apresentados na Figura 3.16, de forma semelhante a um campo de tensões. E para efeito de dimensionamento, o Modo I é considerado o mais importante, pois atende ao modo de fratura da maioria das peças trincadas, apresentando também maior desenvolvimento em termos de metodologias analíticas e experimentais.

Na Figura 3.17, Griffith propõe um modelo para a determinação da abertura de trinca numa região interna de um material. Nesse modelo foi considerada uma trinca com comprimento 2a no meio do material submetido a tensões uniformemente distribuídas, σ_{∞} , normal ao plano e, todo o material abaixo e acima da trinca está livre de tensão.

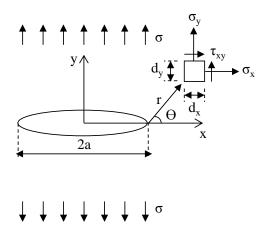


Figura 3.17 - Abertura de trinca sob tensão uniforme normal ao plano. (Griffith, 1920)

Anderson (1995) apresenta o campo de tensões atuantes no ponto da abertura de uma trinca em um material elástico submetido a uma tensão uniforme, conforme mostrado na Figura 3.18.

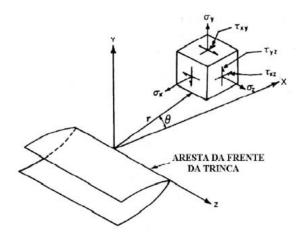


Figura 3.18- Abertura de trinca sob tensão uniforme e coordenadas na frente da trinca. (Anderson, 1995)

Dessa forma, o campo de tensões para o modo geométrico tipo Modo I em estado plano é dado pelas Equações 3.13, 3.14 e 3.15.

$$\sigma_{x} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$
 (3.13)

$$\sigma_{y} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$
 (3.14)

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$
 (3.15)

Entre os modelos que visam explicar a propagação das trincas por fadiga destaca-se o trabalho de Paris (1960) que determinou, experimentalmente, ser a variação do fator de intensidade de tensões ($\Delta \sigma$) e não a tensão propriamente dita, que controla a propagação das trincas.

3.3.1.2 Curva S-N ou Curva de Wöhler

No século XIX, Wöhler desenvolveu um trabalho mostrando que, ao sofrer tensões alternadas, um metal falha em níveis de tensões bem abaixo do esperado. O primeiro método desenvolvido para estudar esse processo foi a tensão nominal (curva S-N) que até hoje é largamente aplicado (Lemos, 2005). No gráfico da curva S-N, no eixo das abscissas aparecem os números de ciclos (N) para a fratura (ou log de N) que representam o ciclo de

vida útil em fadiga e, no eixo das ordenadas, aparecem os dados da tensão (S) que podem ser expressos, também, por meio de logaritmo.

Como qualquer outra propriedade mecânica, as propriedades dos materiais sujeitos a fadiga podem ser determinadas por ensaios de laboratório. A abordagem utilizada para a apresentação dos resultados dos ensaios de fadiga é através da curva S-N ou curva de Wöhler, onde é gerado o gráfico da tensão (σ) versus o número de ciclos (N) necessários para que ocorra a fratura. Normalmente, para o número de ciclos (N) emprega-se uma escala logarítmica, e a tensão lançada no gráfico é a tensão nominal (podendo ser σ_a , $\sigma_{máx}$, $\sigma_{mín}$), como mostrado na Figura 3.19.

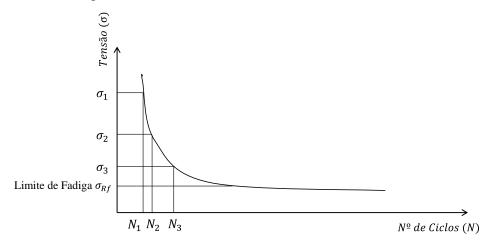


Figura 3.19 - Curva S-N ou curva de Wöhler.

O gráfico da Figura 3.19 apresenta que, com a diminuição da tensão aplicada, o corpo de prova resiste a um maior número de ciclos. Nota-se, também, que diminuindo a tensão a partir de um certo nível (limite de fadiga), a curva se torna praticamente horizontal, ou seja, o número de ciclos tende a ser infinito para o rompimento do corpo de prova. Essa tensão, que praticamente não provoca mais a fratura por fadiga, chama-se limite de fadiga ou resistência à fadiga do material considerado.

De acordo com Filho (2002), as curvas S-N apresentam algumas limitações. Um exemplo dado é que o método não permite separar as etapas de iniciação e de propagação da fissura, o que causa muita dificuldade na avaliação do comportamento de elementos mecânicos com entalhes acentuados e de estruturas com fissuras.

A Mecânica da Fratura estuda os processos mecânicos que levam à propagação de fissuras, que diminui a resistência do material. Nesse sentido, é realizada uma abordagem capaz de acompanhar o estágio da propagação da fissura por meio do monitoramento em ensaios com corpos de prova com fissuras preexistentes. Ressalta-se que o monitoramento da propagação das fissuras não é objeto de estudo nesse trabalho.

Os materiais poliméricos e os cerâmicos são, também, suscetíveis à ruptura por fadiga. A falha por fadiga é particularmente imprevisível, pois acontece sem que haja qualquer aviso prévio para os materiais frágeis.

3.3.1.3 Teoria de acúmulo de danos

É apresentado um método que relata o dano resultante de diferentes variações de tensão aplicadas por vários períodos de tempo. Apesar de haver teorias de danos lineares e não lineares disponíveis é, rotineiramente, utilizado em prática da engenharia civil, a teoria de danos linear que é fácil de entender e aplicar, e que dá resultados satisfatórios. Esta é a primeira regra de danos lineares proposta por *Palmgren*, em 1924, e desenvolvida por *Miner*, em 1945. É conhecida como a regra *Palmgren-Miner* ou a regra *Linear de Danos* e, simplesmente, assume que a fração de dano, que resulta de qualquer nível de variação de tensão, é uma função linear do número de ciclos que acontece na variação de tensão. O dano total de todos os níveis de variação de tensão que são aplicados no detalhe é, naturalmente, a soma de todas essas ocorrências.

Segundo Cervo (2004), tal modelo assume que a fração de dano no material causado pela aplicação de um nível de tensão σ_i é linearmente proporcional à relação entre o número de ciclos de carregamento nesse nível de tensão σ_i e o número de ciclos total teórico que poderia levar o material ao colapso. Dessa forma na Equação 3.16:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i} \tag{3.16}$$

Onde:

 D_i = danos a um nível de tensão i.

 n_i = número de ciclos que acontece no nível de variação de tensão i; e

 N_i = número de ciclos que causaria falha no nível de variação de tensão i.

Dessa forma, o dano total (D) é dado pela soma das frações de dano provocada pela aplicação dos ciclos em cada nível de tensão considerando a superposição dos efeitos, daí essa teoria ser chamada de cumulativa, como mostrado na Equação 3.17:

$$D = \sum_{i=1}^{n} D_i = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_n}{N_n}$$
(3.17)

A ruptura do material por fadiga deverá ocorrer quando a soma dos danos para todos os níveis de tensão alcançar uma unidade. Embora amplamente aplicado, o modelo de *Palmgren-Miner* tem sido somente parcialmente representativo no comportamento à fadiga de estrutura de concreto armado. Sendo assim, a falha ocorrerá quando o dano total atingir o valor crítico de 1 (100%), como mostrado na Equação 3.18.

$$D_1 + D_2 + \dots + D_n \ge 1 \tag{3.18}$$

Cumpre ressaltar que essa expressão não leva em conta qual a ordem ou sequência na qual cada ciclo de carregamento, a um dado nível de tensão, é aplicado. Além disso, não é levado em consideração o histórico anterior de carregamentos. Entretanto, conforme consta na obra de Cervo (2004), a partir de pesquisas foi concluído que a sequência de aplicação dos carregamentos pouco influencia no comportamento à fadiga.

Embora seja uma teoria linear, conforme Maggi (2004), não fora comprovado que alguma teoria não linear de acúmulo de danos forneça resultados mais precisos que o modelo linear. Teorias não lineares também exigem mais dados experimentais diminuindo a praticidade de sua aplicação.

Esses fatos fazem com que a regra de *Palmgren-Miner* ainda seja utilizada com boa confiabilidade na concepção de danos sob fadiga.

4 METODOLOGIA DA ANÁLISE DA FADIGA DAS ARGAMASSAS COLANTES INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII

A análise da fadiga em argamassa colante industrializada usada no revestimento cerâmico foi realizada por meios de ensaios experimentais com corpos de prova moldados com argamassas colantes industrializadas Tipo II e III. Essas argamassas foram escolhidas devido a sua característica física e mecânica conforme especificado na ABNT NBR 14.081:2012. O Item 4.1 apresenta os aspectos relacionados ao processo experimental para a análise da fadiga das argamassas colantes a partir das suas Curvas S-N ou curva de *Wöhler* de tração e compressão. Destacam-se nos Itens 4.1.1 e 4.1.2, respectivamente, o preparo das argamassas colantes e o procedimento de moldagem e cura dos corpos de prova usados nos ensaios de fadiga à compressão e à tração. No Item 4.1.3, descrevemos os ensaios estáticos das argamassas colantes industrializadas que compreendem o ensaio de resistência à tração na flexão (Item 4.1.3.1) e à compressão axial (Item 4.1.3.2) e, ainda, a determinação da consistência através do cone de penetração (Item 4.1.3.3). E, finalmente, no Item 4.1.4 apresentamos a metodologia dos ensaios dinâmicos representados pelo ensaio à fadiga, propriamente dito.

Além da análise experimental, o Item 4.2 apresenta a metodologia usada na análise numérica para o estudo e avaliação da fadiga em revestimento cerâmico de fachada usando o conceito de elementos finitos e a variação do transiente térmico da temperatura registrada na cidade de Brasília – DF.

4.1 METODOLOGIA DA ANÁLISE EXPERIMENTAL

O sistema de revestimento cerâmico é um conjunto de elementos distintos e que funcionam como uma estrutura organizada constituída por: substrato (base); chapisco; argamassa regularizadora (emboço); argamassa colante; placa cerâmica; diferentes tipos de juntas de movimentação e argamassa de rejuntamento. São todos esses elementos que têm composições e características mecânicas diferentes e que geram esforços diferentes, mas que devem apresentar, no final, um equilíbrio de todas as tensões que agem no sistema de revestimento cerâmico para que não ocorram danos que comprometam a sua estrutura e o seu desempenho.

A partir desse modelo, este trabalho propõe analisar o comportamento das tensões em um corpo de prova submetido a solicitações térmicas cíclicas num cenário típico de sistema de revestimento cerâmico. Além da experimentação apresentada neste item, a proposta deste trabalho é construir, também, um modelo numérico em elementos finitos que possa mostrar as tensões e deformações atuantes no sistema de revestimento e provenientes de solicitações térmicas. Observa-se que a temperatura incidente numa fachada varia com o passar do tempo e em função de um conjunto de fatores de exposição, tais como intempéries (chuva, sol, calor, vento, etc.), peso próprio, impactos, dentre outros. Nesse caso, o sistema de revestimento cerâmico está submetido a um carregamento térmico transiente que gera um conjunto de tensões e deformações no sistema de revestimento que podem causar a sua ruptura. Primeiramente, para o estudo do efeito da temperatura transiente sobre o sistema de revestimento cerâmico de fachadas e para o desenvolvimento do modelo numérico, foi necessário realizar o levantamento de algumas propriedades mecânicas dos materiais utilizados no revestimento.

A análise experimental foi elaborada com o objetivo de se estudar a influência das tensões cíclicas e o efeito de fadiga sobre o sistema de revestimento cerâmico, visando traçar a Curva S-N ou curva de *Wöhler* de tração e compressão de fadiga das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII, conforme apresentado na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Programa experimental para traçar a curva S-N de fadiga das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

O programa experimental do estudo da fadiga seguiu as orientações da ABNT NBR 14081:2012 - Argamassa colante industrializada para assentamento de placas

cerâmicas. A seguir, serão descritas as fases do programa experimental, bem como os métodos de ensaios e os materiais empregados no sistema de revestimento cerâmico.

4.1.1 Preparo das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII

As argamassas utilizadas no processo de moldagem dos corpos de prova desta pesquisa foram as argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII comercializadas no mercado local da marca "Votomassa", mostradas na Figura 4.2, preparadas de acordo com a Norma ABNT NBR 14081-1:2012, que estabelece os requisitos para argamassas colantes industrializadas destinadas ao assentamento de placas cerâmicas pelo método de camada fina.





Figura 4.2 - Argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

Adaptado:

http://www.vcimentos.com.br/extras/pdf/votomassa/ACII_Colante_Exterior.pdf, dia do acesso 15/09/2015.

http://www.vcimentos.com.br/extras/pdf/votomassa/ACIII_Colante_Exterior.pdf, dia do acesso 15/09/2015.

A mistura das argamassas colantes foi realizada de acordo com a indicação do fabricante na embalagem, ou seja, utilizou-se o intervalo de água que foi na relação de 20kg de argamassa colante industrializada para 4.4 litros de água, no caso da argamassa colante ACII, e para 5.7 litros de água, no caso da argamassa colante ACIII. A partir dessa recomendação e para evitar o desperdício de material na moldagem do corpo de prova, neste trabalho utilizou-se o volume de água proporcional a 10kg de argamassa colante, ou seja, 2.2 litros de água para a argamassa colante ACII e 2.85 litros de água para a argamassa colante ACIII. A mistura foi homogeneizada com um misturador acoplado a uma furadeira de baixa velocidade até

obter uma consistência macia e trabalhável, conforme apresentado na Figura 4.3. O tempo de mistura foi em média de 2 (dois) minutos e com intervalo de tempo de 15 (quinze) minutos para maturação, que representa o tempo necessário para os aditivos iniciarem sua ação, e depois mais 1 (um) minuto para a mistura final sem acrescentar água e pó, de acordo com a especificação adotada pelo fabricante das argamassas colantes industrializadas.



Figura 4.3 - Procedimento das misturas de acordo com o fabricante das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

4.1.2 Procedimento de moldagem e cura dos corpos de prova usados no ensaio de fadiga à compressão e à tração

Para o ensaio à compressão de fadiga, utilizou-se o procedimento de moldagem e cura de corpos de prova conforme especificado na ABNT NBR 5738:2015 — Procedimento para moldagem do corpo de prova. Foi utilizado um corpo de prova de molde cilíndrico com diâmetro de 10cm e altura de 20cm, seguindo a especificação do Item 4.1.1 da norma. O preenchimento do molde dos corpos de prova foi realizado com as argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII e preparadas conforme descrito no Item 4.1.1 deste capítulo.

Com relação ao procedimento de moldagem especificado no Item 7 da norma ABNT NBR 5738:2015, a preparação dos moldes foi realizada com a aplicação de uma camada fina de óleo mineral nas paredes internas dos moldes dos corpos de prova. Em seguida, para a moldagem dos corpos de prova foi realizado o enchimento do molde cilíndrico com as argamassas colantes em duas camadas de espessuras iguais, sendo que a última camada recebeu uma quantidade em excesso para que as argamassas colantes ao serem adensadas manualmente no molde preenchessem todo o volume do cilindro.

O adensamento dos corpos de prova foi realizado de forma manual com uma haste de adensamento em dois momentos, após a colocação da primeira camada de argamassa colante no molde e depois do enchimento da segunda camada. Em cada momento, o adensamento manual com uma haste correspondeu à aplicação de 12 golpes em cada camada, sendo distribuídos uniformemente em toda a seção transversal do molde, de modo a garantir a uniformidade dos corpos de prova e garantir que a primeira camada, quando adensada com a haste, fosse atravessada em toda a sua espessura, sem bater na base do molde e que a segunda camada fosse adensada em toda a sua espessura e a haste atravesse, aproximadamente, 20mm da camada inferior.

Por fim, foi realizado o arrasamento do topo da superfície do molde cilíndrico com o auxílio de uma régua para retirada do excesso das argamassas colantes e, em seguida, a colocação de um pano úmido sobre o molde para evitar a perda de umidade dos corpos de prova para o ambiente, conforme apresentado na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Moldagem dos corpos de prova em argamassa colante.

Os corpos de prova foram desmoldados após 24h conforme especificado na ABNT NBR 5738:2015, receberam uma identificação e foram armazenados em uma câmara úmida por um período de, no mínimo, 28 dias para a cura final.

Para o ensaio de fadiga à compressão, os corpos de prova foram retificados em uma retificadora mecânica nas suas duas faces para garantir uma superfície de contato plana para ser alinhada com o equipamento MTS 810, como mostrado na Figura 4.5.





Figura 4.5 - Equipamento e o corpo de prova sendo retificado para o ensaio de fadiga à compressão.

Para o ensaio de fadiga à tração, foi usada a mesma dimensão dos corpos de prova do trabalho de Uchôa (2007).

O cálculo e as dimensões do corpo de prova estão na Tabela 4.1 que deve ser entendida observando-se os parâmetros definidos na Figura 4.6. Na Tabela 4.1, a "base" corresponde à área maior A_1 e o "corpo" corresponde à área menor A_2 - ver Figura 4.6(a). As dimensões da base e do corpo são tais que, a tensão de pico limita-se à tensão máxima de resistência à tração obtida da média dos ensaios à tração na flexão, chegando-se a uma dimensão do corpo de prova fácil de ser adaptada à máquina MTS 810. O fator de concentração de tensão K_t é dependente dos parâmetros "D", "d" e "r" do corpo de prova - ver ábaco da Figura 4.7. Neste caso, "D" é a maior largura da peça, "d" é a menor largura da peça e, "r" é o raio de curvatura para a zona de entalhe. O cálculo da tensão de pico é feito com K_t . Em seguida, tendo-se presente a faixa de trabalho do equipamento, chega-se a níveis de força para as garras do equipamento MTS 810. A Tabela 4.1 resume estes valores.

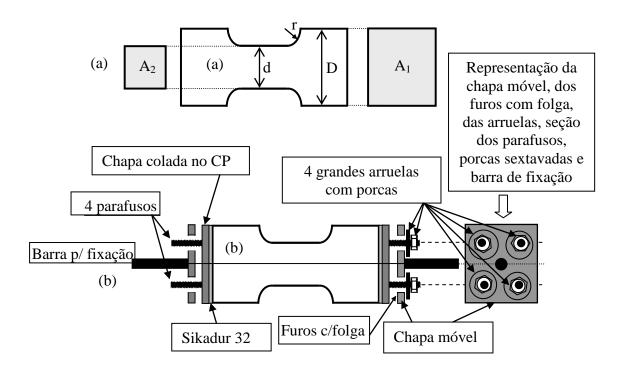


Figura 4.6: (a) Corpo de prova. (b) Mecanismo de fixação na garra do MTS 810.

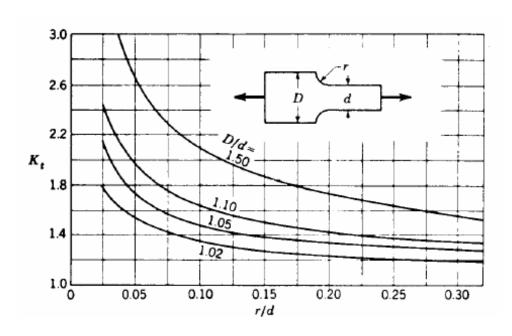


Figura 4.7 – Fator de concentração de tensão de uma barra retangular sob tração.

Tabela 4.1 – Resumo dos cálculos do corpo de prova das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII para o ensaio de fadiga.

Corpo de Prova para o Ensaio de Fadiga

BASE = DxE			
D=Largura	12 cm		
E=Espessura	12 cm		
CORPO =	dxE		
r/d =	0,28 adm.		
d = D-2r	7,74 cm		
r =	2,13 cm		
K _t - Ábaco	1,60 adm.		
A ₁ = Área Maior	144,00 cm ²		
A ₂ = Área Menor	92,90 cm ²		

Os corpos de prova foram moldados com argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII em uma forma metálica (Figura 4.8(a)) usando 3 camadas de argamassa colante com 4cm cada uma delas, para garantir a uniformidade em toda a seção transversal do molde. Cada camada foi adensada com haste aplicando-se 25 golpes. Depois da moldagem, os corpos de prova foram cobertos com pano úmido para minimizar a perda de umidade para o ambiente, conforme ilustrado na Figura 4.8(b).

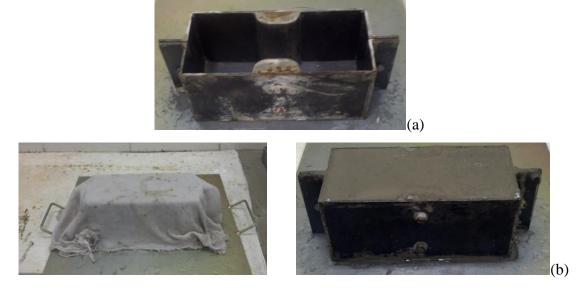


Figura 4.8 – (a) Forma metálica de chapa de aço do corpo de prova. (b) Moldagem dos corpos de prova para ensaio de fadiga à tração.

4.1.3 Ensaio das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII

Devido à inexistência de uma norma padronizada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT que especifique uma metodologia para a realização de ensaios de resistência a tração e compressão para as argamassas colantes industrializadas, utilizou-se a norma ABNT NBR 13279:2005 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, sendo nesse caso, aplicada para as argamassas colantes industrializadas usadas nesse trabalho. Essa norma especifica os métodos de ensaio para determinar a resistência à tração na flexão e à compressão axial das argamassas de reboco. As propriedades mecânicas das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII que compõem o sistema de revestimento cerâmico devem cumprir os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 13279:2005.

Já para a análise da consistência da pasta das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII utilizou-se a norma ASTM C 780-96 "Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry". Essa norma especifica o método de teste de penetração do cone para medir a composição das argamassas e suas propriedades plástica e endurecida.

4.1.3.1 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio para determinar a resistência à tração na flexão das argamassas colantes foi realizado seguindo-se as recomendações da norma ABNT NBR 13279:2005 — Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Esse ensaio consiste na aplicação de uma carga centrada sobre o corpo de prova prismático bi apoiado até sua ruptura por flexão. Para esse ensaio foi utilizado uma prensa manual, como mostra a Figura 4.9.





Figura 4.9 - Ensaio de resistência à tração na flexão.

A resistência à tração na flexão é determinada através da Equação 4.1.

$$R_f = \frac{1.5F_f L}{40^3}$$
 Eq. 4.1

Onde:

- R_f é a resistência à tração na flexão, em MPa;
- F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em N;
- L é a largura entre os suportes, em mm.

4.1.3.2 Ensaio de resistência à compressão axial

Para determinar a resistência à compressão axial da argamassa colante, também, foram realizados ensaios de acordo com a norma ABNT NBR 13279:2005, conforme descrito a seguir. Inicialmente, utilizaram-se as metades dos três corpos de prova do ensaio de resistência à tração na flexão, posicionando-as no dispositivo de apoio na prensa manual, conforme apresenta a Figura 4.10, de modo que a face rasada não ficasse em contato com o dispositivo de apoio nem com o dispositivo de carga da prensa. Em seguida, aplicou-se uma carga com velocidade de (500 ± 50) N/s até ocorrer à ruptura do corpo de prova.





Figura 4.10 - Ensaio de resistência à compressão axial.

A resistência à compressão axial é calculada através da Equação 4.2.

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$
 Eq. 4.2

Onde:

- R_c é a resistência à compressão, em MPa;
- F_c é a carga máxima aplicada, em N;
- 1600 é a área da seção, considerada quadrada do dispositivo de carga 40mm x 40mm, em mm².

4.1.3.3 Determinação da consistência da argamassa colante através do cone de penetração

Nesse ensaio, a consistência das argamassas colantes é determinada através da resistência de penetração de um cone metálico. Utilizou-se como referência para a realização desse ensaio, a norma ASTM C 780-96 "Standard Test Method for Preconstruction and Construction Evaluation of Mortars for Plain and Reinforced Unit Masonry".

Depois de preparada, a argamassa colante é colocada em um recipiente cilíndrico de PVC com as seguintes dimensões: 75mm de diâmetro e 60mm de profundidade. A colocação da argamassa colante no recipiente ocorre em três camadas, sendo aplicados 20 golpes em cada camada até a borda do recipiente, sem realizar adensamento. Por fim, é feito o arrasamento do topo do cilindro. Em seguida, coloca-se o cone metálico rente à superfície do cilindro,

efetuando-se a leitura inicial. Em seguida, libera-se o cone para que ocorra a sua penetração no corpo de prova pela ação da força da gravidade. Cessada a penetração, efetua-se a leitura final. A diferença entre a leitura final e a inicial determina a consistência da argamassa colante. O resultado do ensaio é expresso em milímetros (mm). O equipamento e a realização do ensaio são mostrados na Figura 4.11.







Leitura Final

Figura 4.11 - Ensaio de consistência da argamassa colante através do cone de penetração.

4.1.4 Ensaio dinâmico da argamassa colante industrializada

Os ensaios dinâmicos representam os ensaios de fadiga e podem ser à tração, à compressão, ou em estados de tensão variando entre tração e compressão. Considerando que ainda não existem normas específicas para a realização do ensaio de fadiga de argamassas colantes industrializadas, e a ausência de uma rotina de ensaio normatizada, elaborou-se a metodologia descrita a seguir para avaliar o comportamento das argamassas colantes industrializadas de revestimento cerâmico, seguindo as especificações do Item 4.1.2.

4.1.4.1 Ensaio de fadiga

O ensaio de fadiga consiste na aplicação de carga cíclica em corpo de prova apropriado e padronizado conforme o tipo de ensaio a ser realizado. O ensaio de fadiga é capaz de fornecer dados quantitativos relativos às características de um material ou componente ao suportar, por um longo período, sem se romper, cargas repetitivas ou cíclicas. Os principais resultados

do ensaio de fadiga são a tensão de limite de resistência à fadiga (σ_{Rf}), a tensão de resistência à fadiga (σ_f) e a vida em fadiga em ciclos (N_f), ou seja, número de ciclos em que ocorre a ruptura do corpo de prova para um determinado nível de tensão (S) acima do σ_{Rf} . A tensão de limite de resistência à fadiga (σ_{Rf}) corresponde a um limite de tensão, tal que, para valores abaixo desse limite, o corpo de prova nunca sofrerá ruptura por fadiga. Por sua vez, a tensão de resistência à fadiga (σ_f) corresponde à tensão na qual ocorre a ruptura do corpo de prova para um número de ciclos de aplicação de carga (normalmente ocorre entre 10^6 e 10^7 ciclos para o aço). Por fim, a vida em fadiga (N_f) consiste no número de ciclos que causará a ruptura para um determinado nível de tensão (Garcia *et al.*, 2000).

No ensaio experimental de resistência à tração e à compressão, o limite de resistência do material é determinado em função da carga máxima atingida durante o ensaio de caracterização, após a qual ocorre a ruptura do material. Fica, então, estabelecido que o material não se romperá com uma carga menor que aquela submetida aos esforços estáticos. Entretanto, quando são aplicados esforços dinâmicos, repetidos ou flutuantes em um determinado material, o mesmo pode se romper com uma carga bem inferior à carga máxima atingida durante o ensaio estático à tração ou à compressão. Nesse caso, tem-se a chamada ruptura por fadiga do material.

Os resultados dos ensaios de fadiga apresentados nesse trabalho foram obtidos de ensaios à tração e à compressão. Para os ensaios de resistência à fadiga, utilizou-se a máquina de ensaio universal MTS 810, onde o ensaio pode ser operado com controle de tensão ou de deslocamento que ocorre através de um dispositivo hidráulico. O equipamento MTS 810 propicia uma ampla capacidade de ensaios para vários tipos de corpos de prova. Essa máquina é controlada por um computador, e através deste é que se ativa a bomba e o atuador hidráulico para a realização do ensaio. As garras de fixação dos corpos de prova também são acionadas hidraulicamente, de maneira que se pode variar a pressão nas mesmas, utilizando um controlador na base da própria máquina. A máquina, ainda, possui uma célula de carga que mede, em uma faixa de 1kN a 100kN, a força aplicada aos corpos de prova, conforme mostrado na Figura 4.12.

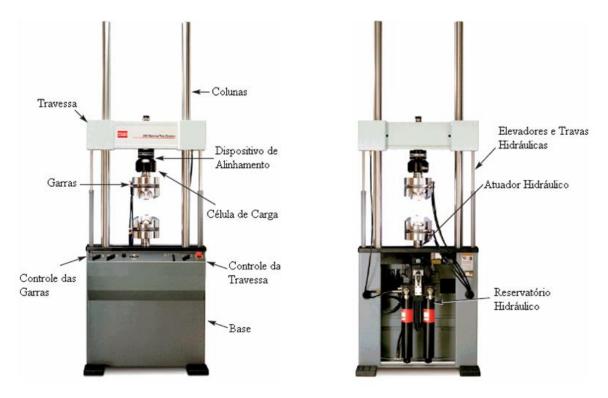


Figura 4.12 - Equipamento MTS 810 Material Test System.

As Figuras 4.13(a) e (b) apresentam os corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à fadiga onde, para o ensaio à tração, foram dimensionados através do fator de concentração de tensão geométrico (Uchôa, 2007) e, para o ensaio à compressão, foram utilizados os corpos de prova descritos no Item 4.1.2.





Figura 4.13 – Corpos de prova montados para os ensaios (a) à tração e (b) à compressão.

4.2 METODOLOGIA DA ANÁLISE NUMÉRICA

Foi adotado um modelo numérico em elementos finitos com o objetivo de estudar e avaliar as tensões e deformações atuantes no sistema de revestimento cerâmico de fachada, provenientes de solicitações térmicas quando o mesmo estiver sendo submetido a um transiente térmico, bem como, as deformações e deslocamentos decorrentes dessas solicitações de temperatura. Com isso, obteve um melhor entendimento do comportamento estrutural do sistema de revestimento cerâmico de fachadas, principalmente, sobre a resistência de aderência nas interfaces entre o substrato / chapisco /argamassa de emboço / argamassa colante / revestimento cerâmico e rejunte.

Para a definição das propriedades físicas e mecânicas de cada material do sistema de revestimento cerâmico, para o modelo numérico deste trabalho, foram caracterizadas as propriedades mecânicas das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII e suas propriedades físicas foram obtidas do fabricante. Enquanto que, as propriedades físicas e mecânicas dos demais materiais do sistema de revestimento cerâmico foram extraídas das pesquisas de Saraiva (1998), Uchôa (2007) e Chagas (2009).

O carregamento térmico aplicado no sistema de revestimento cerâmico gera diferentes solicitações de tensões entre os diversos materiais que compõem o sistema de revestimento. Isso ocorre devido à diferença de temperatura entre a superfície externa e superfície interna do revestimento caraterizado pelo efeito chamado de condução térmica.

4.2.1 Transiente térmico adotado

Do ponto de vista meteorológico e geográfico, o clima é definido pela combinação de uma série de elementos climáticos, tais como, temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitações, ventos e radiação solar incidente. Estes elementos variam sob a ação de fatores regionais como latitude, altitude, relevo, vegetação, massas de ar, entre outros.

O clima de Brasília é o tropical com estação seca de inverno (Aw) de acordo com a classificação climática de *Koppen-Geiger*, com um verão bastante úmido e chuvoso e um inverso seco e, relativamente, frio. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média anual é de 20,6°C, sendo setembro o mês mais quente com

temperatura média de 21,7°C, e julho o mês mais frio, com temperatura média de 18,3°C. Porém, a temperatura varia de forma significativa nas áreas menos urbanizadas, onde a temperatura média das mínimas de inverno cai para cerca de 10°C a 5°C. A umidade relativa do ar é de, aproximadamente, 70%, podendo chegar aos 20% ou menos durante o período de inverno.

Conforme os registros do INMET referentes ao período de 1961 a 2013, a menor temperatura já registrada em Brasília foi de 1,6°C em 18 de julho de 1975, e a máxima histórica nesse mesmo período atingiu 35,8°C em 28 de outubro de 2008.

A Tabela 4.2 mostra a variação da temperatura ao longo do dia 28/10/2008 em Brasília – DF com valores medidos em °C usando o termômetro de bulbo seco e o termômetro de máxima instantânea. O valor máximo registrado pelo termômetro de bulbo seco foi de 34,9°C às 17horas UTC (*Universal Time Coordinated*), o que corresponde às 14h no horário oficial de Brasília - DF.

O termômetro de bulbo seco serve para determinar a temperatura do ar e recebe esta denominação porque o seu bulbo encontra-se sem nada em volta e está em contato direto com ar, por isso indica a temperatura instantânea do ar. A temperatura de bulbo seco é a temperatura indicada por um termômetro comum, não exposto a radiação e representa a verdadeira temperatura do ar úmido. Já o termômetro de máxima serve para determinar a temperatura máxima do ar ocorrida no dia. O termômetro de máxima é um termômetro de mercúrio que tem a particularidade de reter no tubo capilar o mercúrio que por ele passa, devido a um estrangulamento. Quando a temperatura desce, uma vez atingido o valor máximo, o mercúrio não volta em sentido contrário, desde que o termômetro se encontre na horizontal, possibilitando assim o registro da temperatura máxima do ar. Neste trabalho, utilizou-se a temperatura registrada pelo termômetro de bulbo seco ao longo do dia 28/10/2008 em Brasília – DF.

Tabela 4.2 - Variação de temperatura no dia 28/10/2008 - INMET.

	Valor Registrado	Valor Registrado
Hora UTC	(°C)	(°C)
	Termômetro de Bulbo Seco	Termômetro de Máxima Instantânea
01h	26,1	27,3
02h	25,6	26,1
03h	26,2	26,7
04h	24,5	26,2
05h	24,3	24,6
06h	23,5	24,3
07h	23,1	23,5
08h	22,9	23,2
09h	22,4	22,9
10h	24,9	24,9
11h	27,2	27,2
12h	28,4	28,5
13h	30,8	30,9
14h	32,4	32,4
15h	33,6	33,6
16h	34,6	34,6
17h	34,9	35,2
18h	34,8	35,3
19h	34,2	34,9
20h	33,5	34,4
21h	32,1	33,5
22h	30,9	32,1
23h	29,8	31,0
24h	27,3	28,4

Para a análise térmica do sistema de revestimento cerâmico foram consideradas duas tonalidades de cerâmica para o revestimento, sendo uma clara e outra escura. O coeficiente de absorção térmica, para a cerâmica de cor clara é de 0,45 e para a cerâmica da cor escura é de 0,95, segundo Thomaz (1989).

O gráfico da Figura 4.14 mostra a variação da temperatura externa (t_{ext}) da fachada do sistema de revestimento cerâmico, ao longo do dia 28/10/2008, que representa o dia mais quente registrado em Brasília-DF no período de 1961 a 2013. Além disso, esse gráfico mostra a variação de temperatura externa na superfície da cerâmica clara (t_{extClara}) e cerâmica escura (t_{extEscura}) considerando a incidência da temperatura externa (t_{ext}) sobre as cerâmicas e o coeficiente de absorção térmica de cada tonalidade de cerâmica. Os resultados dos dados apresentados na Figura 4.14 estão detalhados no Apêndice A.

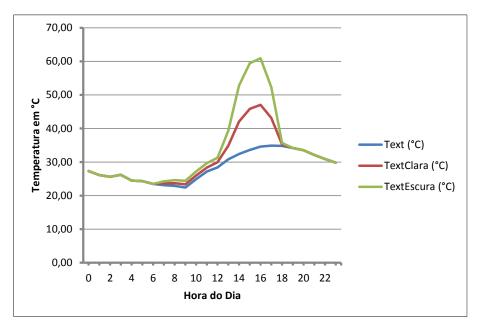


Figura 4.14 - Temperatura externa na superfície da cerâmica clara e escura no dia 28/10/2008 em Brasília-DF.

As Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam a simulação da variação das temperaturas nas interfaces do sistema de revestimento cerâmico ao longo das 24h do dia, considerando a tonalidade da cerâmica (clara e escura) e a temperatura interna (t_{int}) do ambiente (18°C e 25°C), conforme Saraiva (1998) e Uchôa (2007). Assim sendo, a Figura 4.15 mostra o transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica clara e temperatura interna (t_{int}) do ambiente de 18°C. A Figura 4.16 mostra o transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica clara e temperatura interna (t_{int}) do ambiente de 25°C. A Figura 4.17 mostra o transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica escura e temperatura interna (t_{int}) do ambiente de 18°C. Por fim, a Figura 4.18 mostra o transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica escura e temperatura interna (t_{int}) do ambiente de 25°C. Nas Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 apresenta-se a variação da temperatura externa (text), da temperatura interna (t_{int}) e da temperatura nas interfaces: cerâmica/argamassa colante (t_{C/AC}), argamassa colante/emboço ($t_{AC/E}$), emboço/substrato ($t_{E/S}$) e substrato/reboco interno ($t_{S/R}$). Os resultados dos dados que geraram as Figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 estão detalhados no Apêndice A.

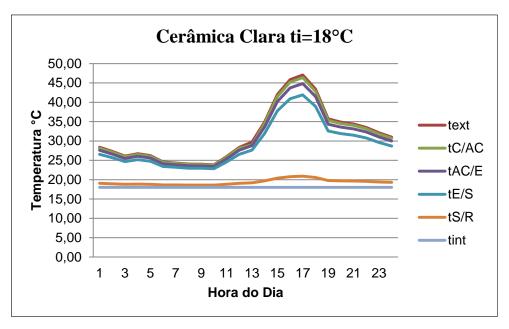


Figura 4.15 – Transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica clara e temperatura interna do ambiente de 18°C – Transiente 1.

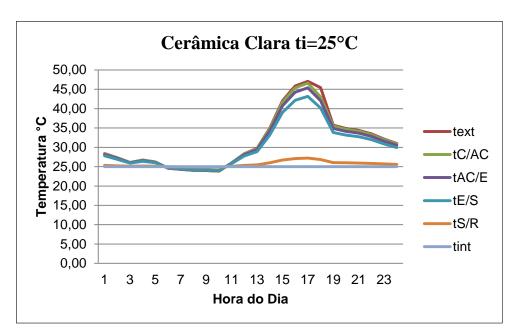


Figura 4.16 - Transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica clara e temperatura interna do ambiente de 25°C – Transiente 2.

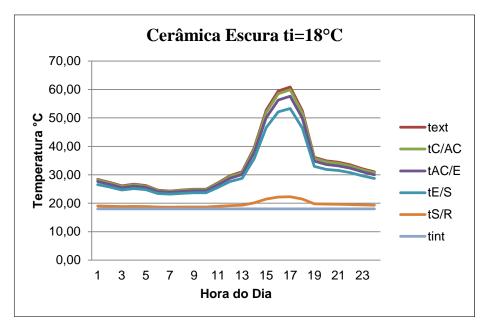


Figura 4.17 - Transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica escura e temperatura interna do ambiente de 18°C – Transiente 3.

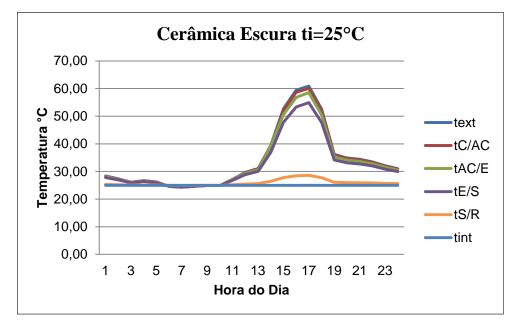


Figura 4.18 - Transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica escura e temperatura interna do ambiente de 25°C – Transiente 4.

4.2.2 O modelo em Elementos Finitos

O objetivo a ser alcançado com o modelo simplificado do sistema de revestimento cerâmico proposto é analisar suas temperaturas e tensões a partir da definição de um modelo em elementos finitos escolhido para representar o sistema em estudo, considerando a condição

de contorno que será adotada no modelo simplificado do sistema de revestimento cerâmico, as propriedades dos materiais empregados no mesmo sistema e o carregamento térmico adotado.

A estrutura de revestimento cerâmico, conforme apresentada na Figura 4.19, foi discretizada em malha de elementos finitos e segue a mesma forma definida nos trabalhos de Saraiva (1998) e Uchôa (2007). As diretrizes do modelo de estrutura de revestimento cerâmico de fachada adotado neste trabalho são detalhadas no Capítulo 3.

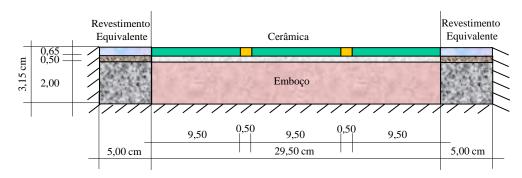


Figura 4.19 - Estrutura de revestimento cerâmico da análise para análise numérica.

O modelo numérico proposto para representar um sistema de revestimento cerâmico de fachadas foi definido usando o software ANSYS (1994) e sua biblioteca de elementos finitos. Foi utilizado o elemento plano PLANE55 (2-D Thermal Solid) para a análise do transiente térmico e o elemento PLANE42 (2-D Structural Solid) para a análise das tensões termomecânicas. Esses elementos apresentam quatro nós e são adotados em análises de sólidos bidimensionais (2-D) em estado plano de deformação. O elemento térmico PLANE55 tem um grau de liberdade por nó (temperatura) e permite o cálculo das temperaturas em sólidos e a propriedade de capacidade de calor (cp) para análises de transientes térmicos. O elemento PLANE42 tem dois graus de liberdade por nó (deslocamentos em "x" e "y") e permite analisar as tensões na malha modelada. A Figura 4.20 apresenta a geometria dos elementos PLANE42 e PLANE55 do software ANSYS.

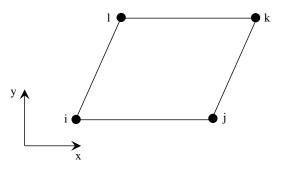


Figura 4.20 – Geometria dos elementos PLANE42 e PLANE55 do software ANSYS.

As propriedades do material necessárias para os elementos PLANE55 e PLANE42 utilizados no modelo numérico proposto na Figura 4.19 estão descritas nas Tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente. Considerando o modelo numérico que representa um sistema de revestimento cerâmico, as propriedades dos elementos PLANE55 e PLANE42 são definidas para cada camada de material do modelo numérico e são consideradas para a análise do transiente térmico (elemento PLANE55) e análise estrutural baseada nas tensões termomecânicas (elemento PLANE42).

Tabela 4.3 – Propriedades requeridas do elemento PLANE55. (Uchôa, 2007)

Tipo de Elemento	PLANE55 – Elemento para análise térmica		
Nós que definem o elemento	Nós I, J, K e L		
Graus de Liberdade por Nó	Temperaturas T em cada nó		
Propriedades do Material	Condutividade térmica: KXX		
	Massa específica: DENS		
	Calor específico: C		
Carregamento Usado	Temperatura imposta		
Opção de Análise	Keyopt(3)=0 (estado plano)		

Tabela 4.4 – Propriedades requeridas do elemento PLANE42. (Uchôa, 2007)

Tipo de Elemento	PLANE42 – Elemento para análise estrutural	
Nós que definem o elemento	Nós I, J, K e L	
Graus de Liberdade por Nó	Translações UX e UY	
Propriedades do Material	Módulo de elasticidade: EX, EY	
	Coeficiente de Poisson: NUXY	
	Coeficiente de dilatação térmica: ALPX e ALPY	
Carregamento Usado	Temperatura nos nós T(I), T(J), T(K) e T(L)	
Opção de Análise	Keyopt(3)=2 (estado plano de deformação)	

As propriedades condutividade térmica, massa específica e calor específico do elemento PLANE55 usadas para os materiais emboço, argamassa colante, rejunte e cerâmica estão apresentadas na Tabela 4.5. Da mesma forma, a Tabela 4.6 apresenta as propriedades módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e coeficiente de dilatação térmica do elemento PLANE42 usadas para os materiais do sistema de revestimento representado no modelo numérico. As propriedades coeficiente de dilatação térmica, condutividade térmica e calor específico foram definidas conforme os valores recomendados por Rivero (1985) e pelo relatório nº 16277 do IPT (1981), respectivamente. As propriedades massa específica e coeficiente de Poisson para todos os materiais do modelo numérico foram obtidas de Saraiva (1998). E, por fim, o módulo de elasticidade da argamassa colante foi obtido dos ensaios realizados e descritos no Capítulo 4 deste trabalho. Enquanto, para os materiais argamassa de emboço, rejunte e cerâmica, utilizou-se o valor do módulo de elasticidade obtido nas pesquisas de Saraiva (1998).

Tabela 4.5– Propriedades atribuídas ao elemento PLANE55.

	Condutividade	Massa Específica	Calor Específico
Material	Térmica	(DENS em kg/m³)	(C em J/kg°C)
	(KXX em w/m°C)		
Emboço	1,40	$2,31 \times 10^3$	1000
Argamassa Colante ACII	0,84	$1,89 \times 10^3$	1000
Rejunte	1,40	$2,54 \times 10^3$	1000
Cerâmica	2,00	$2,51 \times 10^3$	920

Tabela 4.6 – Propriedades atribuídas ao elemento PLANE42.

	Módulo de	Coef. de Dilatação	Coeficiente de
Material	Elasticidade	Térmica	Poisson
	(EX em GPa)	(ALPX em ${}^{\circ}$ C $^{-1}$)	(NUXY)
Emboço	5,499	$11,5 \times 10^{-6}$	0,2
Argamassa Colante ACII	2,950	8.7×10^{-6}	0,2
Rejunte	7,879	4.2×10^{-6}	0,2
Cerâmica	41,600	6.8×10^{-6}	0,2

A estrutura de revestimento cerâmico da Figura 4.19 foi discretizada com os elementos finitos, obtendo-se assim a malha mostrada na Figura 4.21.

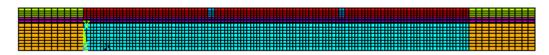


Figura 4.21 – Esquema da disposição da malha de elementos finitos discretizando a estrutura do sistema de revestimento cerâmico de fachada.

Com o modelo em MEF podemos avaliar as tensões normais S_x (na direção x), S_y (na direção y) e de cisalhamento S_{xy} das regiões superior, central e inferior de cada uma das três camadas (cerâmica, argamassa colante industrializada, emboço) do sistema de revestimento cerâmico.

Embora, o modelo discretizado inclua as regiões equivalentes representadas nas extremidades da malha da Figura 4.19 da estrutura de revestimento cerâmico de fachada, essas regiões não são de interesse para essa pesquisa, pois são regiões fictícias necessárias para simular o revestimento real de uma fachada. Dessa forma, foram considerados, somente, os valores de tensão obtidos para as camadas "reais" da estrutura de revestimento cerâmico, com os quais foram avaliados o desempenho da estrutura quanto à fadiga provocada por ciclos provenientes do transiente térmico. Para a análise de tensões, na malha de elementos finitos (Figura 4.21) são impostas as condições de contorno de impedimento ao deslocamento no eixo x, como mostrado na Figura 4.22.

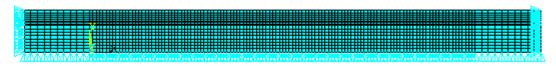


Figura 4.22 – Condição de contorno para análise termomecânica no ANSYS da estrutura do sistema de revestimento cerâmico de fachada.

Para o estudo da análise numérica será adotado a mesma metodologia empregada no trabalho de Uchôa (2007), ou seja, a utilização de vários cenários (estudos de casos) para a avaliação do comportamento do sistema de revestimento cerâmico com relação à análise das tensões atuantes nesse sistema. Esses cenários foram definidos e representados pela combinação de argamassa colante industrializada do Tipo ACII, da tonalidade da cerâmica do sistema de revestimento com cerâmica clara e cerâmica escura, do transiente térmico ao longo do dia respectivamente (transiente-1, transiente-2, transiente-3 e transiente-4) e da temperatura interna média adotada de 18°C e 25°C. A Tabela 4.7 apresenta os cenários de casos que foram estudados para a análise da fadiga do sistema de revestimento cerâmico usando a abordagem da análise numérica.

Tabela 4.7 - Estudo dos casos que serão analisados na análise numérica no ANSYS.

Caso	Tonalidade	Argamassa Colante	Temperatura Interna	Transiente
Caso	da Cerâmica	industrializada	Média (°C)	Térmico
Caso 1	Clara	ACII	18	Transiente-1
Caso 2	Clara	ACII	25	Transiente-2
Caso 3	Escura	ACII	18	Transiente-3
Caso 4	Escura	ACII	25	Transiente-4

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios experimentais sobre o fenômeno da resistência à fadiga em argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII do sistema de revestimento cerâmico. O objetivo é estudar as propriedades mecânicas das argamassas colantes industrializadas submetidas a ensaios de tração na flexão e compressão axial. Assim sendo, foram realizadas as caracterizações das argamassas colantes industrializadas do tipo ACII e ACIII na resistência à tração na flexão e à compressão axial, o módulo de elasticidade na flexão e a consistência de pasta das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII. Os experimentos realizados foram utilizados para o estudo das tensões de resistência à fadiga na tração e compressão axiais. Além disso, os resultados das análises experimentais da resistência à fadiga na tração e compressão axiais foram utilizados para traçar a Curva S-N ou Curva de Wöhler das argamassas colantes industrializadas do tipo ACII e ACIII.

O programa experimental foi realizado seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 4 deste trabalho. Foi feito o levantamento das principais propriedades mecânicas das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII empregadas no assentamento da cerâmica do revestimento. Para os ensaios experimentais deste trabalho foram avaliadas duas argamassas colantes industrializadas ACII e ACII, descritas no Item 4.1.1.

5.1 CARACTERIZAÇÃO À FADIGA DAS ARGAMASSAS COLANTES INDUSTRIALIZADAS ACII E ACIII

Os ensaios de caracterização das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII são necessários para o levantamento das suas propriedades mecânicas no estado fresco e endurecido, a fim de obter o teor da consistência da pasta, o módulo de elasticidade na flexão e a tensão de ruptura à tração na flexão e à compressão axial. Essas propriedades mecânicas foram discutidas no Capítulo 3 deste trabalho. O Apêndice B apresenta os resultados dos ensaios estáticos das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

5.1.1 Determinação da consistência da pasta

Os resultados da caracterização das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII no

estado fresco, no que diz respeito à sua consistência da pasta das argamassas colantes usadas nesta pesquisa, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Resultado do ensaio da consistência das pastas das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

	RESULTADOS		
PROPRIEDADE	MÉDIOS		
	ACII	ACIII	
Consistência da Pasta (cm)	0,52	0,59	

5.1.2 Determinação da resistência à tração na flexão

A Tabela 5.2 mostra os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII no estado endurecido com relação a sua resistência à tração na flexão, cujos resultados obtidos correspondem ao desvio absoluto médio dos corpos de prova ensaiados aos 28 dias, de acordo com a norma da ABNT NBR 13279:2005. Observase que o valor da resistência à tração na flexão obtido para as argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII foi de 3,77MPa e 3,26MPa, respectivamente. A partir desses resultados, foram definidas as cargas para os ensaios de fadiga à tração axial das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII, considerando valores aleatórios sempre abaixo da resistência de ruptura à tração na flexão das argamassas colantes.

Tabela 5.2 - Resultado da tensão de ruptura do ensaio à tração na flexão das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

	RESULTADOS		
PROPRIEDADE	MÉI	DIOS	
	ACII	ACIII	
Resistência à tração na flexão (MPa)	3,77	3,26	

5.1.3 Determinação da resistência à compressão axial

A Tabela 5.3 mostra os resultados dos ensaios de caracterização das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII no estado endurecido sobre a sua resistência à compressão axial, cujos resultados obtidos correspondem ao desvio absoluto médio dos corpos de prova

ensaiados aos 28 dias, de acordo com a norma da ABNT NBR 13279:2005. Observa-se que o valor da resistência à compressão axial obtidos para as argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII foi de 10,91MPa e 9,68MPa, respectivamente. A partir desses resultados, foram definidas as cargas para os ensaios de fadiga à compressão axial das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII, considerando valores aleatórios sempre abaixo da resistência de ruptura à compressão axial das argamassas colantes.

Tabela 5.3 - Resultado da tensão de ruptura do ensaio à compressão axial das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

	RESULTADOS		
PROPRIEDADE	MÉDIOS		
	ACII	ACIII	
Resistência à compressão axial (MPa)	10,91	9,68	

5.1.4 Determinação do módulo de elasticidade na flexão

A Tabela 5.4 mostra os resultados da caracterização das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII no estado endurecido no que diz respeito ao módulo de elasticidade na flexão das argamassas.

Tabela 5.4 - Resultado dos ensaios do módulo de elasticidade na flexão das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

	RESULTADOS		
PROPRIEDADE	MÉI	DIOS	
	ACII	ACIII	
Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	2,97	5,44	

5.2 ENSAIOS À FADIGA DAS ARGAMASSAS COLANTES ACII E ACIII

Para a realização dos ensaios à fadiga conforme metodologia descrita no Item 4.1.3, foram utilizados os corpos de prova de argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII, utilizadas no sistema de revestimento cerâmico, formado por um conjunto de diversas camadas de materiais sobre as quais é colocada a placa cerâmica e, entre as placas cerâmicas, aplica-se o rejunte. Nesse caso, consideramos o sistema de revestimento cerâmico composto

de: reboco, chapisco, substrato, chapisco, argamassa de emboço, argamassa colante industrializada, peças cerâmicas e rejunte.

Os ensaios apresentados neste trabalho foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB) e no Laboratório de Materiais do Instituto Federal de Brasília (IFB) – Campus Samambaia.

Nos ensaios experimentais, inicialmente, foram caracterizadas as propriedades mecânicas de resistência à tração na flexão e à compressão axial das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII aplicáveis no sistema de revestimento cerâmico, conforme apresentado no Item 5.1. Em seguida, foi realizado o dimensionamento das cargas para os ensaios de fadiga à tração e compressão axiais das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII. E, finalmente, apresenta-se a metodologia utilizada para os ensaios à fadiga das argamassas colantes industrializadas do tipo ACII e ACIII sob tração e compressão axiais para a obtenção das suas curvas S-N. A curva S-N, também, conhecida como curva de *Wöhler* representa um gráfico de magnitude de tensão (S) por número de ciclos (N).

Apresenta-se aqui o procedimento referente aos ensaios de fadiga nas argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII. Foram realizados ensaios à tração e à compressão axiais aplicando-se ciclos de repetição de cargas até a ruptura do corpo de prova ou a interrupção do ensaio ao alcançar um número de ciclos acima de 10^6 ciclos. As tensões cíclicas variaram de zero até o valor da tensão máxima desejada, e estes ciclos são caracterizados por carregamento senoidal com amplitude S e a razão entre a tensão máxima e mínima de zero. Os resultados obtidos foram utilizados para traçar a Curva S-N das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII. A seguir, os itens 5.2.1 e 5.2.2 apresentam os resultados dos ensaios de fadiga à tração e compressão axiais, respectivamente.

5.2.1 Ensaio de fadiga à tração axial

As Tabelas 5.5 e 5.6 mostram os resultados dos ensaios de fadiga à tração axial para as argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII, respectivamente, apresentando os valores de carga, tensão (S) à tração axial adotada e o número de ciclos (N) realizados para romper ou não os corpos de prova. Esses ensaios foram realizados no equipamento MTS 810.

Tabela 5.5 - Ensaio de fadiga à tração axial da argamassa colante industrializada ACII.

Força kN	Área cm²	Tensão MPa	Hz	Nº de Ciclos	Situação
34,35	92,90	3,77	3	1	Rompeu
6,00	92,90	0,71	3	4.213	Rompeu
6,00	92,90	0,71	3	4.473	Rompeu
5,50	92,90	0,61	3	1.213.388	Não rompeu
5,50	92,90	0,61	3	1.045.456	Não rompeu
5,00	92,90	0,55	3	1.031.194	Não rompeu
5,00	92,90	0,55	5	1.022.125	Não rompeu
5,00	92,90	0,55	5	1.027.123	Não rompeu

Conforme apresentado na Tabela 5.5, foram realizados sete ensaios de fadiga à tração axial para a argamassa colante industrializada ACII. Em cinco dos ensaios realizados, o corpo de prova não rompeu até a quantidade de ciclos acima de 10⁶ ciclos quando se tomava a decisão de parar o ensaio e assumia-se que a ruptura não ocorreria mais. Dentre os ensaios, três foram realizados com uma carga de 5,00kN e tensão de 0,55MPa e dois deles com uma carga de 5,50kN e tensão de 0,61MPa. No sexto ensaio realizado, optou-se por uma carga de 6,00kN e tensão de 0,71kN/cm². Nesse caso, houve a ruptura da argamassa colante industrializada ACII no ensaio de fadiga à tração axial e a ruptura ocorreu com 4.473 ciclos. Realizou-se mais um ensaio com a mesma carga e tensão utilizadas no sexto ensaio, e confirmou-se a ruptura da argamassa colante industrializada ACII no ensaio de fadiga à tração axial e a ruptura ocorreu com 4.213 ciclos.

A Figura 5.1 mostra a curva S-N ou de *Wöhler* apresentando o comportamento da argamassa colante industrializada ACII quando submetida a tensões cíclicas para a obtenção da resistência à fadiga à tração axial.

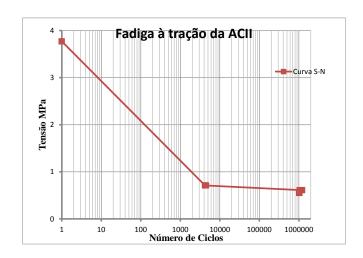


Figura 5.1 - Gráfico da curva S-N de fadiga à tração da ACII.

Tabela 5.6 - Ensaio de fadiga à tração axial da argamassa colante industrializada ACIII.

Força kN	Área cm²	Tensão MPa	Hz	Nº de Ciclos	Situação
29,60	92,90	3,26	3	1	Rompeu
10,50	92,90	1,22	3	1.979	Rompeu
10,00	92,90	1,12	3	62.517	Rompeu
10,00	92,90	1,12	3	87.526	Rompeu
9,00	92,90	1,02	3	1.076.778	Não rompeu
9,00	92,90	1,02	3	1.062.537	Não rompeu
9,00	92,90	1,02	3	1.045.541	Não rompeu

Conforme apresentado na Tabela 5.6, foram realizados seis ensaios de fadiga à tração axial para a argamassa colante industrializada ACIII. Em três dos ensaios realizados, o corpo de prova não rompeu até a quantidade de ciclos acima de 10^6 ciclos, quando, da mesma forma que para os ensaios realizados com a argamassa colante industrializada ACII, tomava-se a decisão de parar o ensaio e assumia-se que a ruptura não ocorreria mais. Dentre os ensaios, três foram realizados com uma carga de 9,00kN cuja a tensão de 1,02MPa. No quarto ensaio realizado optou-se por uma carga de 10,00kN e tensão de 1,12MPa. Nesse caso, houve a ruptura da argamassa colante industrializada ACIII no ensaio de fadiga à tração axial e a ruptura ocorreu com 87.526 ciclos. Realizou-se um quinto ensaio com a mesma carga e tensão utilizadas no sexto ensaio, e confirmou-se a ruptura da argamassa colante industrializada ACIII no ensaio de fadiga à tração axial e a ruptura ocorreu com

62.517 ciclos. Por fim, o sexto ensaio realizado com uma carga de 10,32kN e tensão de 1,22MPa, também, rompeu com apenas 1.979 ciclos.

A Figura 5.2 mostra a curva S-N ou de *Wöhler* do comportamento da argamassa colante industrializada ACIII quando submetida a tensões cíclicas para a obtenção da resistência à fadiga à tração axial.

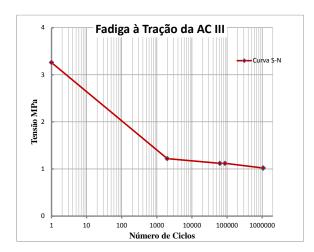


Figura 5.2 - Gráfico da curva S-N de fadiga à tração da ACIII.

5.2.2 Ensaio de fadiga à compressão axial

As Tabelas 5.7 e 5.8 mostram os resultados dos ensaios de fadiga à compressão axial para as argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII, respectivamente, apresentando os valores de carga, tensão (S) à compressão axial adotada e o número de ciclos (N) realizados para romper ou não os corpos de prova. Esses ensaios foram realizados no equipamento MTS 810.

Tabela 5.7 - Resultado do ensaio de fadiga à compressão da argamassa colante industrializada ACII.

Força kN	Área cm²	Tensão MPa	Hz	Nº de Ciclos	Situação
84,00	78,54	10,91	3	1	Rompeu
80,00	78,54	10,38	3	236.848	Rompeu
66,00	78,54	8,56	3	271.581	Rompeu
66,00	78,54	8,56	3	283.439	Rompeu
45.00	78,54	5,10	3	345.890	Rompeu
39,00	78,54	5,00	3	1.051.637	Não Rompeu
39,00	78,54	5,00	3	1.086.048	Não Rompeu
39,00	78,54	5,00	3	1.092.080	Não Rompeu

Conforme apresentado na Tabela 5.7, foram realizados oito ensaios de fadiga à compressão axial para a argamassa colante industrializada ACII. Em três dos ensaios realizados, sendo com uma carga de 39,00kN e tensão de 5,00MPa, o corpo de prova não rompeu até a quantidade de ciclos acima de 10⁶ ciclos, quando se tomava a decisão de parar o ensaio e assumia-se que a ruptura não ocorreria mais. Em seguida, foram realizados mais quatro ensaios com as cargas de 45,00kN, 66,00kN e 86,00kN e tensões de 5,10MPa, 8,56MPa e 10,38MPa, respectivamente. Nesses casos, houve a ruptura da argamassa colante industrializada ACII no ensaio de fadiga à compressão axial e a ruptura ocorreu com 345.890 ciclos, 283.439 e 271.581 ciclos e 236.848 ciclos, respectivamente.

A Figura 5.3 mostra a curva S-N ou de *Wöhler* do comportamento da argamassa colante industrializada ACII quando submetida a tensões cíclicas para a obtenção da resistência à fadiga à compressão axial.

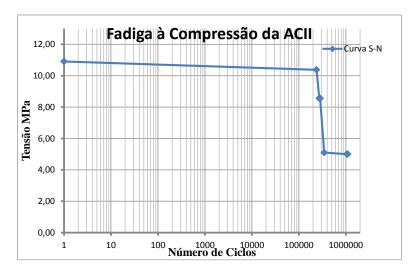


Figura 5.3 - Gráfico da curva S-N de fadiga à compressão da ACII.

Tabela 5.8 - Resultado do ensaio de fadiga à compressão da argamassa colante industrializada ACIII.

Força kN	Área cm²	Tensão MPa	Hz	Nº de Ciclos	Situação
74,60	78,54	9,68	3	1	Rompeu
70,00	78,54	9,07	3	36.968	Rompeu
70,00	78,54	9,07	3	62.660	Rompeu
65,00	78,54	8,46	3	298.632	Rompeu
65,00	78,54	8,46	3	328.604	Rompeu
60,00	78,54	7,75	3	1.018.584	Não Rompeu
60,00	78,54	7,75	3	1.056.984	Não Rompeu
55,00	78,54	7,13	3	1.040.196	Não Rompeu

Conforme apresentado na Tabela 5.8, foram realizados sete ensaios de fadiga à compressão axial para a argamassa colante industrializada ACIII. Em três dos ensaios realizados, sendo dois deles com uma carga de 60,00kN e tensão de 7,75MPa, e um ensaio com uma carga de 55,00kN e tensão de 7,13MPa, o corpo de prova não rompeu até a quantidade de ciclos acima de 10⁶ ciclos, quando se tomava a decisão de parar o ensaio e assumia-se que a ruptura não ocorreria mais. Em seguida, foram realizados mais quatro ensaios de fadiga à compressão onde se observou a ruptura da argamassa colante industrializada ACIII. Dentre eles, dois ensaios foram com uma carga de 65,00kN e tensão de 8,46MPa e, os outros dois ensaios, com uma carga de 70,00kN e tensão de 9,07MPa. Nesses casos, houve a ruptura da argamassa colante industrializada ACIII no ensaio de fadiga à compressão axial e a ruptura ocorreu com 328.604, 298.632, 62.660 e 36.968 ciclos, respectivamente.

A Figura 5.4 mostra a curva S-N ou de *Wöhler* do comportamento da argamassa colante industrializada ACIII quando submetida a tensões cíclicas para a obtenção da resistência à fadiga à compressão axial.

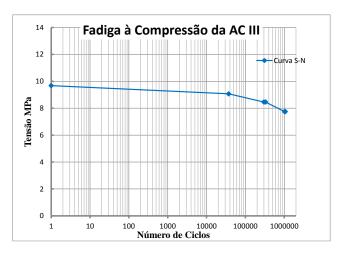


Figura 5.4 - Gráfico da curva S-N de fadiga à compressão da ACIII.

5.3 CURVAS S-N PARA AS ARGAMASSAS COLANTES ACII E ACIII E ARGAMASSA DE EMBOÇO

Para determinar a capacidade das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII em resistir a um conjunto de esforços repetitivos de compressão e tração, adotou-se como base a metodologia trabalhada por Cervo (2004) que identificou as curvas S-N de fadiga à compressão e à tração para o concreto. Assim sendo, utilizamos a Equação 3.7 apresentada por Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979) e os dados dos ensaios experimentais apresentados no Item 5.2 para determinar a curva S-N (ou de *Wöhler*) de fadiga à compressão e à tração para as argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII.

De forma análoga, a partir dos resultados dos ensaios de fadiga à tração na argamassa de emboço apresentados em Uchôa (2007) é traçada a curva S-N de fadiga à tração para a argamassa de emboço e, também, a sua curva S-N de fadiga à compressão, usando o paralelismo das curvas S-N entre tração e compressão, conforme descrito em Uchôa (2007).

5.3.1 Curvas S-N de fadiga à compressão e à tração para argamassa colante industrializada ACII

A Figura 5.5 apresenta as curvas S-N de fadiga à compressão e à tração para a argamassa colante industrializada ACII, geradas a partir dos dados dos ensaios experimentais (Tabelas 5.5 e 5.7) e conforme já representadas nas Figuras 5.1 e 5.3.

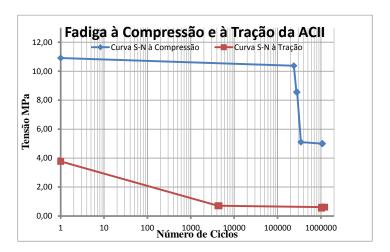


Figura 5.5 - Curvas S-N de Fadiga à Compressão e à Tração da ACII.

As curvas S-N apresentadas na Figura 5.5 podem, ainda, ser linearizadas conforme mostrado na Figura 5.6, onde a coordenada "y" é a tensão alternada em MPa; a abcissa "x" é o logaritmo decimal do número de ciclos 10⁶ ciclos.

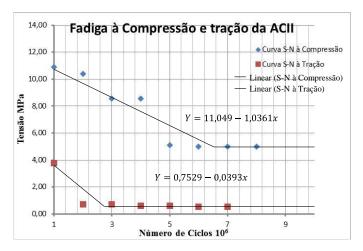


Figura 5.6 - Curvas S-N de Fadiga à Compressão e à Tração Linearizadas para ACII.

Considerando as curvas linearizadas da Figura 5.6 e a Equação 3.7 sugerida por Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979), podemos associar as variáveis "x" e "y" nas equações linearizadas

da Figura 5.6 como sendo "log(N)" e "S", respectivamente. Sabendo-se que para $N > 10^6$ ciclos o corpo de prova não se rompe, conforme apresentado nos resultados de ensaio do Item 5.2 e, ainda, na Equação 3.7, se considerarmos R = 0, já que no ensaio a tensão mínima é "0", temos as seguintes equações para a argamassa colante industrializada ACII.

Sob compressão:

Para
$$N < 10^6 \rightarrow S = 11,049 - 1,0361 \log(N)$$

Para $N > 10^6 \rightarrow S = 4,83MPa$

Sob tração:

Para
$$N < 10^6 \rightarrow S = 0,7529 - 0,0393 \log(N)$$

Para $N > 10^6 \rightarrow S = 0,51MPa$

De forma similar ao que foi sugerido por Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979) para o concreto (Equação 3.7) e considerando uma relação *R* diferente de zero entre a tensão mínima e a máxima, têm-se as Equações 5.1 e 5.2 para o ensaio de fadiga à compressão e à tração da argamassa colante industrializada ACII, respectivamente.

$$S = 11,049 - 1,0361(1 - R)\log(N) \tag{5.1}$$

$$S = 0.7529 - 0.0393(1 - R)\log(N) \tag{5.2}$$

Para chegar numa equação mais genérica para a fadiga à compressão e à tração da argamassa colante industrializada ACII e não depender de valores das tensões de compressão (f_{ck}) e de tração (f_{tk}) vamos dividir as Equações 5.1 e 5.2, respectivamente, por f_{ck} e f_{tk} da ACII apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.2, ou seja, 10,91MPa e 3,77MPa. Assim, teremos as Equações 5.3 e 5.4:

$$\frac{S}{f_{ck}} = 1,0127 - 0,0949(1 - R)\log(N) \tag{5.3}$$

$$\frac{S}{f_{tk}} = 0.1997 - 0.0104(1 - R)\log(N) \tag{5.4}$$

5.3.2 Curvas S-N de fadiga à compressão e à tração para argamassa colante industrializada ACIII

A Figura 5.7 apresenta as curvas S-N de fadiga à compressão e à tração para a argamassa colante industrializada ACIII, geradas a partir dos dados dos ensaios experimentais (Tabelas 5.6 e 5.8) e conforme já representadas nas Figuras 5.2 e 5.4.

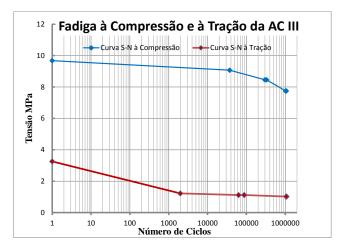


Figura 5.7 - Curvas S-N de Fadiga à Compressão e Tração da ACIII.

As curvas S-N apresentadas na Figura 5.7 podem, ainda, ser linearizadas conforme mostrado na Figura 5.8, onde a coordenada "y" é a tensão alternada em MPa; a abcissa "x" é o logaritmo decimal do número de ciclos 10⁶ ciclos.

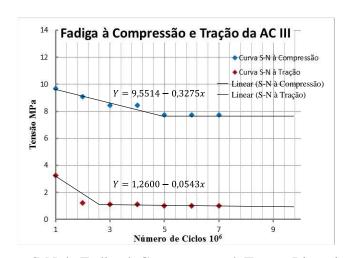


Figura 5.8 - Curvas S-N de Fadiga à Compressão e à Tração Linearizadas para ACIII.

Considerando as curvas linearizadas da Figura 5.8 e a Equação 3.7 sugerida por Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979), podemos associar as variáveis "x" e "y" nas equações linearizadas da Figura 5.8 como sendo " $\log(N)$ " e "S", respectivamente. Sabendo-se que para $N > 10^6$ ciclos o corpo de prova não se rompe, conforme apresentado nos resultados de ensaio do Item 5.2 e, ainda, na Equação 3.7, se considerarmos R = 0, já que no ensaio a tensão mínima é "0", temos as seguintes equações para a argamassa colante industrializada ACIII.

Sob compressão:

Para
$$N < 10^6 \rightarrow S = 9,5514 - 0,3275 \log(N)$$

Para $N > 10^6 \rightarrow S = 7,58MPa$

Sob tração:

Para
$$N < 10^6 \rightarrow S = 1,2600 - 0,0543 \log(N)$$

Para $N > 10^6 \rightarrow S = 0,93 MPa$

De forma similar ao que foi sugerido por Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979) para o concreto (Equação 3.7) e considerando uma relação *R* diferente de zero entre a tensão mínima e a máxima, têm-se as Equações 5.5 e 5.6 para o ensaio de fadiga à compressão e à tração da argamassa colante industrializada ACIII, respectivamente.

$$S = 9,5514 - 0,3275(1 - R)\log(N) \tag{5.5}$$

$$S = 1,2600 - 0,0543 (1 - R) \log(N)$$
(5.6)

Para chegar numa equação mais genérica para a fadiga à compressão e à tração da argamassa colante industrializada ACIII e não depender de valores das tensões de compressão (f_{ck}) e de tração (f_{tk}) vamos dividir as Equações 5.5 e 5.6, respectivamente, por f_{ck} e f_{tk} da ACIII apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.2, ou seja, 9,68MPa e 3,26MPa. Assim, teremos as Equações 5.7 e 5.8:

$$\frac{S}{f_{ck}} = 0.9867 - 0.0338(1 - R)\log(N) \tag{5.7}$$

$$\frac{S}{f_{tk}} = 0.3865 - 0.0166(1 - R)\log(N) \tag{5.8}$$

5.3.3 Curvas S-N de fadiga à compressão e tração da argamassa de emboço

A Tabela 5.9 mostra os resultados dos ensaios de fadiga da argamassa de emboço, conforme realizado por Uchôa (2007) e a Figura 5.9 apresenta as curvas S-N de fadiga à compressão e à tração para a argamassa de emboço, geradas a partir dos dados da Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Resultado do ensaio de fadiga da argamassa de emboço. (Uchôa, 2007)

Tração (MPa) Vida (ciclos) Ciclos log(N) Compressão (MPa)

Tração (MPa)	Vida (ciclos)	Ciclos log(N)	Compressão (MPa)
1,64	1	0,00	4,29
1,29	18	1,26	3,37
1,29	17	1,23	3,37
1,29	39	1,59	3,37
1,08	198	2,30	2,82
1,08	240	2,38	2,82
1,08	210	2,32	2,82
0,86	35714	4,55	2,25
0,86	37482	4,57	2,25
0,86	35203	4,55	2,25
0,65	200934	5,30	1,70
0,65	251000	5,40	1,70
0,55	1336000	6,13	1,44

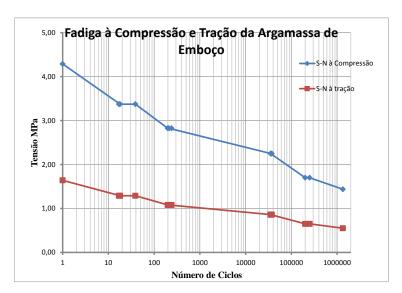


Figura 5.9 - Curvas S-N de Fadiga à Compressão e Tração da Argamassa de Emboço.

As curvas S-N apresentadas na Figura 5.9 podem, ainda, ser linearizadas conforme mostrado na Figura 5.10, onde a coordenada "y" é a tensão alternada "S" em MPa; a abcissa "x" é o logaritmo decimal do número de ciclos 10^6 ciclos; e S_{Rf}^c e S_{Rf}^t são, respectivamente, a resistência à fadiga num ensaio à compressão e à tração.

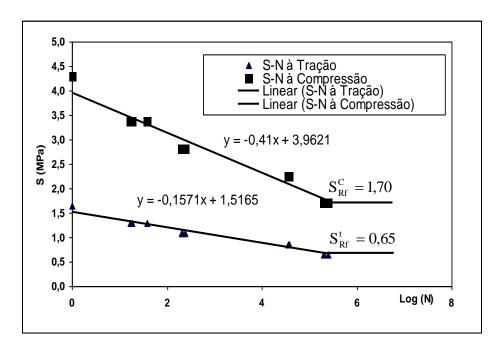


Figura 5.10 - Curvas S-N de Fadiga à Compressão e à Tração Linearizadas para Argamassa de Emboço. (Uchôa, 2007)

Considerando as curvas linearizadas da Figura 5.10 e a Equação 3.7 sugerida por Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979), podemos associar as variáveis "x" e "y" nas equações

linearizadas da Figura 5.10 como sendo " $\log(N)$ " e "S", respectivamente. Considera-se que o corpo de prova não se rompe acima de $2x10^5$ ciclos, conforme apresentado nos resultados de Uchôa (2007) e, ainda, na Equação 3.7, se considerarmos R=0, já que no ensaio a tensão mínima é "0", temos as seguintes equações para a argamassa de emboço.

Sob compressão:

Para
$$N < 2x10^5 \rightarrow S = 3,9621 - 0,41 \log(N)$$

Para $N > 2x10^5 \rightarrow S = 1,78MPa$

Sob tração:

Para
$$N < 2x10^5 \rightarrow S = 1,5165 - 0,1571 \log(N)$$

Para $N > 2x10^5 \rightarrow S = 0,68MPa$

De forma similar ao que foi sugerido por Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979) para o concreto (Equação 3.7) e considerando uma relação *R* diferente de zero entre a tensão mínima e a máxima, têm-se as Equações 5.9 e 5.10 para o ensaio de fadiga à compressão e à tração da argamassa de emboço, respectivamente.

$$S = 3,9621 - 0,41 (1 - R)\log(N)$$
(5.9)

$$S = 1,5165 - 0,1571 (1 - R)\log(N)$$
(5.10)

Para chegar numa equação mais genérica para a fadiga à compressão e à tração da argamassa de emboço e não depender de valores das tensões de compressão (f_{ck}) e de tração (f_{tk}) vamos dividir as Equações 5.9 e 5.10, respectivamente, por f_{ck} e f_{tk} da argamassa de emboço obtidos de Uchôa (2007), no caso, 4,29MPa e 1,64MPa. Assim, para ambas as tensões de compressão e tração, teremos a mesma Equação 5.11 e, nesse caso, usamos f_k para representar f_{ck} e f_{tk} :

$$\frac{S}{f_{ck}} = 0.9235 - 0.0956(1 - R)\log(N) \tag{5.11}$$

6 ANÁLISE NUMÉRICA DAS TENSÕES

Este capítulo apresenta a análise dos casos de incidência dos transientes térmicos em sistemas de revestimento cerâmico de fachadas, bem como, as variações de tensão e a análise de fadiga. A distribuição de temperatura e de tensão será objeto de estudo usando-se o modelo simplificado e as análises feitas pelo MEF quando o sistema de revestimento estiver submetido aos transientes térmicos definidos no Item 4.2.1. A curva experimental de comportamento à fadiga das argamassas colantes industrializadas, obtida no Capítulo 5, será utilizada para a avaliação da vida útil do sistema de revestimento cerâmico, em especial, da argamassa colante industrializada ACII de sistema de revestimento cerâmico de fachada.

Na análise numérica térmica e de tensão serão considerados quatro casos relativos à adoção de duas temperaturas internas (18°C e 25°C) e dois tipos de tonalidades de cerâmica do sistema de revestimento (cerâmica clara e escura), todas com ACII. A Tabela 6.1 resume os casos a serem estudados.

Tabela 6.1 - Casos para análise numérica

Caso	Tonalidade	Temperatura	Temperatura do
Caso	da Cerâmica	Interna (°C)	Transiente Térmico
Caso 1	Clara	18	Transiente-1
Caso 2	Clara	25	Transiente-2
Caso 3	Escura	18	Transiente-3
Caso 4	Escura	25	Transiente-4

Inicialmente, são reportados os resultados de distribuição de tensão e a análise de fadiga e, em seguida, a distribuição de temperatura ao longo do tempo para os casos de estudo. O foco de ambas as análises é a região de maior concentração de tensão. A Figura 6.1 identifica no modelo simplificado, a seção que será considerada para a avaliação das tensões. A seção A-A₁, na Figura 6.1, representa uma região de junções das peças cerâmicas com a argamassa de rejunte e, ainda, intercepta a argamassa colante industrializada, a argamassa de emboço do sistema de revestimento cerâmico.

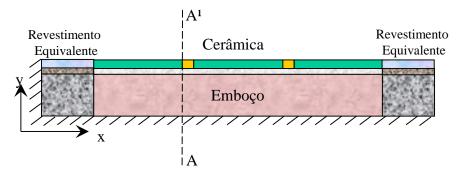


Figura 6.1 - Área em destaque que será estudada.

A Figura 6.2 mostra o corte na seção A-A₁ que representa o modelo numérico simplificado de um sistema de revestimento cerâmico. Essa seção A-A₁ é composta por 9 (nove) nós, distribuídos ao longo desse trecho para representar cada uma das camadas do revestimento cerâmico. Na Figura 6.2 se destaca, ainda, os nós do modelo em MEF para a leitura das tensões. Esses nós estão nas camadas e nas interfaces entre os nós 1468 e 992 dos materiais que compõem o sistema de revestimento cerâmico de fachada.

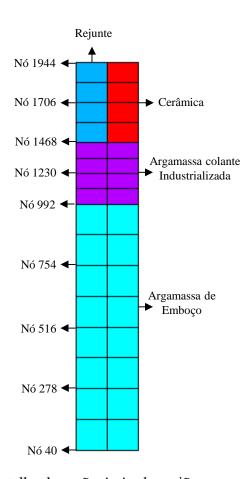


Figura 6.2 - Detalhe da seção A-A₁ da região com os nós da seção.

Nas análises de tensão para a avaliação da resistência à fadiga, necessita-se do cálculo das tensões principais S_1 e S_2 . As análises com o MEF para cada caso especificado na Tabela 6.1 são para avaliar a variação de tensões e temperaturas no modelo que representa o sistema de revestimento cerâmico. A seguir, são apresentados os resultados das análises de tensões e de fadiga.

6.1 ANÁLISE DE TENSÕES E DE FADIGA

Este item apresenta os principais resultados das análises de tensão e de fadiga do modelo numérico definido no *software* ANSYS para o sistema de revestimento cerâmico considerando os quatro casos de estudo mostrados na Tabela 6.1. Esses casos se baseiam na temperatura interna do ambiente de 18°C e 25°C e nas tonalidades das cerâmicas sendo clara e escura. Além disso, nesses quatro casos são analisadas as tensões considerando-se a temperatura mínima e máxima do revestimento cerâmico externo medidas às 7h e 17h, respectivamente, e obtidas a partir do cálculo dos transientes térmicos analisados, tomando-se como base as temperaturas do dia 28/10/2008, conforme descrito no Item 4.2.1.

A orientação dos eixos "x" e "y" pode ser visualizada na Figura 6.1. A seguir, são apresentadas as tensões normais ao longo da direção x (S_x), da direção y (S_y) e a tensão tangencial (S_{xy}), obtidas em cada camada do sistema de revestimento modelado conforme Figura 6.2, para os quatros casos de estudo da Tabela 6.1.

A análise numérica de fadiga para os quatro casos de estudo foi realizada considerando-se apenas a argamassa colante industrializada ACII devido as suas características mecânicas e indicação para uso em ambientes externos, conforme apresentado no Item 3.1.3.1. Além disso, realizou-se a análise numérica de fadiga da argamassa de emboço para os mesmos quatro casos de estudo desta pesquisa.

A curva de fadiga a ser usada para a análise de fadiga da argamassa colante industrializada ACII é a curva experimental representada na Figura 5.6 e, para a análise de fadiga da argamassa de emboço é a curva ilustrada na Figura 5.10, considerando as maiores e menores tensões principais S₁ e S₂ observadas na argamassa colante industrializada (nós 992, 1230 e 1468 do modelo numérico) e na argamassa de emboço (nós 40, 278, 516, 754 e 992 do modelo numérico) para os quatro casos de estudo.

6.1.1 Caso-1

6.1.1.1 Análise da Tensão Normal S_x

A Figura 6.3 apresenta o gráfico das variações da tensão S_x para o Caso 1 obtidas na análise numérica para os nós que representam as diversas camadas dos materiais que compõem o sistema de revestimento cerâmico, em horários de temperatura mínima e máxima, no caso, os horários de 7h e 17h, respectivamente. Pode-se verificar a ocorrência somente de tensões de compressão, devido à influência da condição de contorno e do confinamento adotado no eixo "x". Essa condição é conservadora e se ajusta bem a sistemas de revestimento confinados por vigas e colunas, o que é comum nas edificações. Importante destacar, ainda, que no período do dia entre 7h e 17h existe a influência da radiação solar (I_g) sobre o sistema de revestimento cerâmico de fachada.

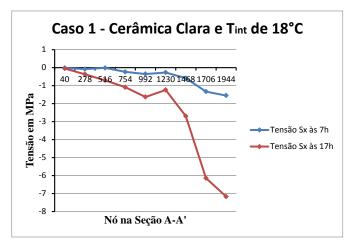


Figura 6.3 - Caso 1: Tensão S_x às 7h e 17h.

Observa-se, também, que ocorreu acentuada variação da tensão S_x das 7h às 17h entre os nós 1468 e 1944 que correspondem às camadas da interface argamassa colante/cerâmica e cerâmica. Isso ocorre não só devido à incidência da temperatura mais também devido aos respectivos módulos de elasticidade e coeficiente de dilatação térmica combinados de cada material que compõem o sistema de revestimento cerâmico modelado. Observa-se, ainda, que a tensão S_x das 7h às 17h tem uma pequena variação acentuada de -0,3546MPa até -1,63MPa no nó 992 que representa a interface da camada de emboço com a argamassa colante industrializada. Entre o nó 992 até o nó 1468 que representa a argamassa colante

industrializada e suas interfaces com emboço e cerâmica, observa-se uma queda de tensão no nó 1230 devido ao baixo valor do módulo de elasticidade da argamassa colante industrializada. Já no nó 1468 até o nó 1944, verifica-se um crescente aumento da variação de tensão S_x chegando aos valores de -1,5531MPa até -7,1644MPa no nó 1944, às 7h e 17h, respectivamente.

A Tabela 6.2 apresenta os valores obtidos para a tensão S_x nos horários de 7h e 17h para o Caso 1 (cerâmica clara e temperatura interna de 18°C).

Tabela 6.2 - Caso 1: Tensão S_x nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S _x às	Tensão S _x às
CAMADA	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	-0,0144	-0,0491
Emboço	278	-0,0801	-0,3677
Emboço	516	-0,0154	-0,7061
Emboço	754	-0,237	-1,0878
Interface E/AC	992	-0,3546	-1,63
Argamassa Colante	1230	-0,2692	-1,2391
Interface AC/C	1468	-0,5851	-2,6954
Cerâmica	1706	-1,3321	-6,1403
Cerâmica	1944	-1,5531	-7,1644

As Figuras 6.4 e 6.5 representam a tensão S_x atuando no sistema de revestimento cerâmico pelo MEF às 7h e 17h, respectivamente.

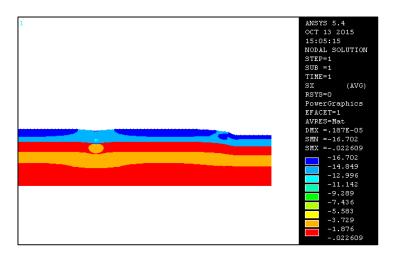


Figura 6.4 - Caso 1: Tensão S_x do modelo numérico às 7h.

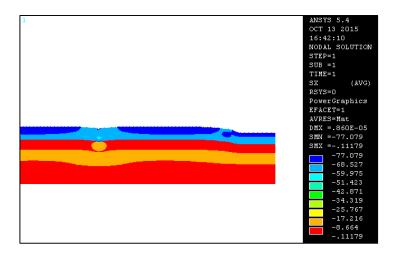


Figura 6.5 - Caso 1: Tensão $S_{\boldsymbol{x}}$ do modelo numérico às 17h.

6.1.1.2 Análise da Tensão Normal S_y

Os resultados obtidos da tensão normal ao longo do eixo "y" (S_y) no Caso 1 às 7h e 17h do dia para os nós do modelo numérico que representam o sistema de revestimento cerâmico são mostrados na Figura 6.6 e na Tabela 6.3.

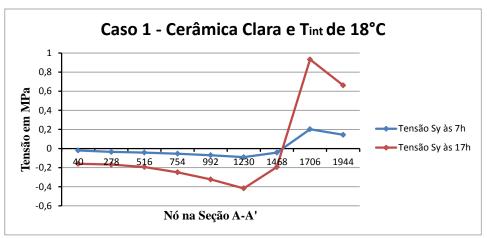


Figura 6.6 - Caso 1: Tensão S_y às 7h e 17h.

Tabela 6.3 - Caso 1: Tensão S_v nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S _y às	Tensão S _y às
CAMADA	NO	7h (MPa) -0,0195 -0,0352	17h (MPa)
Interface S/E	40	-0,0195	-0,1597
Emboço	278	-0,0352	-0,1673
Emboço	516	-0,0418	-0,1931
Emboço	754	-0,0539	-0,2486
Interface E/AC	992	-0,0699	-0,3225
Argamassa Colante	1230	-0,0902	-0,4163
Interface AC/C	1468	-0,0419	-0,1939
Cerâmica	1706	0,2023	0,9321
Cerâmica	1944	0,1435	0,6615

Observa-se na Figura 6.6 que nos nós 1706 e 1944, que representam a cerâmica e a interface cerâmica/rejunte, os valores da tensão S_y são de tração às 7h e 17h. Isso ocorre devido à condição de contorno imposta ao sistema de análise, ou seja, não há confinamento no eixo "y", variando a tensão S_y de 0,1435MPa até 0,9321MPa. Observa-se, também, que nos demais nós do modelo, ou seja, entre a interface da cerâmica/argamassa colante industrializada/emboço os valores da tensão S_y , se comportam como tensão de compressão devido ao confinamento entre as interfaces com valores variando de -0,0902MPa até -0,4163MPa no nó 1230 (argamassa colante industrializada).

As Figuras 6.7 e 6.8 representam a tensão S_y atuando no sistema de revestimento cerâmico Caso 1 pelo MEF às 7h e 17h, respectivamente.

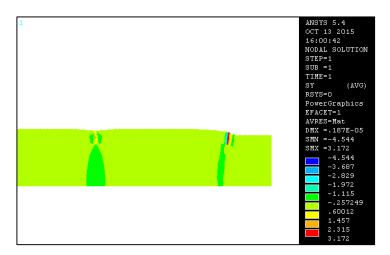


Figura 6.7 - Caso 1: Tensão S_y do modelo numérico às 7h.

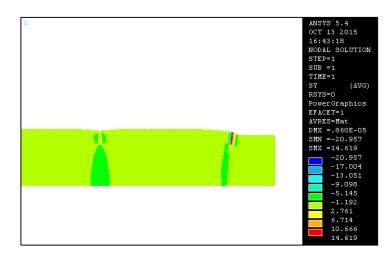


Figura 6.8 - Caso 1: Tensão S_y do modelo numérico às 17h.

6.1.1.3 Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}

A Figura 6.9 mostra o comportamento da tensão de cisalhamento S_{xy} para os nós do modelo numérico do sistema de revestimento cerâmico Caso 1. Essas tensões de cisalhamento são provocadas pela deformação na cerâmica causada pela temperatura externa do ambiente, considerando as temperaturas às 7h e 17h do dia. Os valores da tensão S_{xy} são apresentados na Tabela 6.4.

Observa-se pela Figura 6.9 que ocorreu uma variação mais perceptível da tensão S_{xy} somente entre os nós 1468 e 1944 que representam, respectivamente, as camadas de interface da argamassa colante/cerâmica e cerâmica do modelo numérico. O maior valor da tensão S_{xy} foi registrado no nó 1706 às 17h e corresponde a 0,0791MPa. Nos demais nós do modelo numérico, a tensão S_{xy} medida ficou bem próxima de 0MPa.

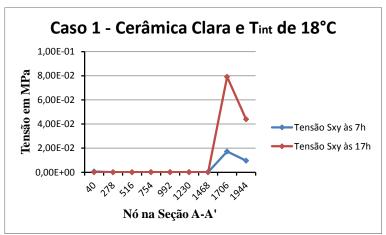


Figura 6.9 - Caso 1: Tensão S_{xy} às 7h e 17h.

Tabela 6.4 - Caso 1: Tensão S_{xy} nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S _{xy} às 7h (MPa)	Tensão S _{xy} às 17h (MPa)
Interface S/E	40	6,59E-04	6,40E-06
Emboço	278	5,46E-06	2,48E-05
Emboço	516	1,01E-05	4,58E-05
Emboço	754	1,32E-05	6,00E-05
Interface E/AC	992	1,44E-05	6,53E-05
Argamassa Colante	1230	1,37E-05	6,21E-05
Interface AC/C	1468	1,18E-04	5,36E-05
Cerâmica	1706	0,0172	0,0791
Cerâmica	1944	9,60E-03	0,0439

As Figuras 6.10 e 6.11 representam a tensão S_{xy} atuando no sistema de revestimento cerâmico Caso 1 pelo MEF às 7h e 17h, respectivamente.

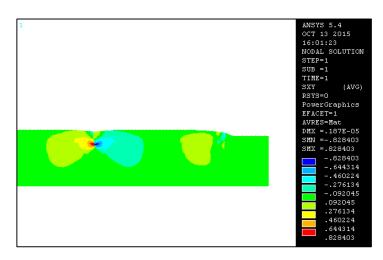


Figura 6.10 - Caso 1: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 7h.

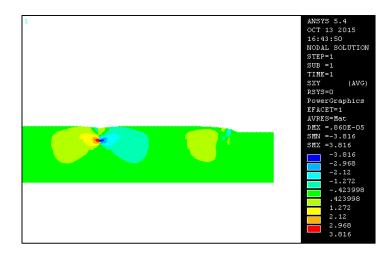


Figura 6.11 - Caso 1: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 17h.

6.1.1.4 Análise da Tensão Principal S₁

A Figura 6.12 mostra as variações da tensão principal S₁ para o Caso 1. Nos nós 1706 e 1944 que representam a cerâmica ocorre tensão à tração variando de 0,1436MPa até 0,9330MPa. Na parte interna do sistema de revestimento cerâmico representado pelo nó 40 até o nó 1468 observa-se que ocorre tensão à compressão variando de -0,0105MPa até -0,4164MPa como mostrado na Tabela 6.5.

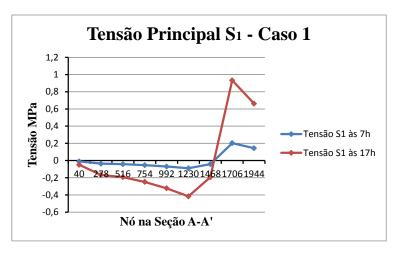


Figura 6.12 – Caso 1: Tensão Principal S₁ às 7h e 17h

Tabela 6.5 – Caso 1: Tensão Principal S₁ nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S ₁ às	Tensão S ₁ às
CAMADA	NU	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	-0,0105	-0,0491
Emboço	278	-0,0363	-0,1673
Emboço	516	-0,0419	-0,1931
Emboço	754	-0,0539	-0,2486
Interface E/AC	992	-0,0700	-0,3226
Argamassa Colante	1230	-0,0903	-0,4164
Interface AC/C	1468	-0,0420	-0,1939
Cerâmica	1706	0,2025	0,9330
Cerâmica	1944	0,1436	0,6618

Na Tabela 6.5 apresenta o comportamento da tensão principal S_1 atuante no sistema de revestimento cerâmico onde ocorre a incidência da radiação solar (I_g) e se verifica a tensão máxima de tração no valor de 0,9330MPa na superfície da cerâmica às 17h.

Os valores da tensão principal S_1 atuante na interface emboço/argamassa colante industrializada/cerâmica às 17h representada pelos nós 992, 1230 e 1468 são, respectivamente -0,3226MPa, -0,4164MPa e -0,1939MPa.

6.1.1.5 Análise da Tensão Principal S₂

A Figura 6.13 mostra as variações da tensão principal S₂ atuando no sistema de revestimento cerâmico e que corresponde, exclusivamente, a uma tensão de compressão. O maior valor de tensão principal S₂ ocorre na superfície do revestimento no nó 1944 e é de -7,1646MPa.

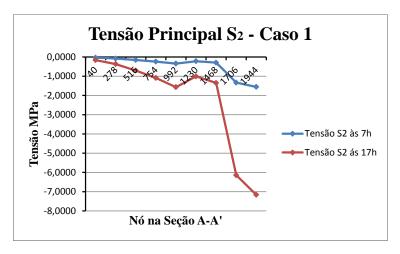


Figura 6.13 – Caso 1: Tensão Principal S₂ às 7h e 17h

As tensões principais S_2 de compressão atuantes na interface emboço/argamassa colante industrializada/cerâmica às 17h correspondentes aos nós 992, 1230 e 1468 são, respectivamente, -1,5676MPa, -1,0072MPa e -1,3488MPa, conforme mostrado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 – Caso 1: Tensão Principal S₂ nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S ₂ às	Tensão S2 às
	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	-0,0346	-0,1598
Emboço	278	-0,0802	-0,3677
Emboço	516	-1,0540	-0,7061
Emboço	754	-0,2370	-1,0878
Interface E/AC	992	-0,3411	-1,5676
Argamassa Colante	1230	-0,2189	-1,0072
Interface AC/C	1468	-0,2929	-1,3488
Cerâmica	1706	-1,3323	-6,1412
Cerâmica	1944	-1,5532	-7,1646

6.1.1.6 Deformada e Concentrada de Tensão

As Figuras 6.14 e 6.15 representam a deformada e a tensão equivalente de *Von Mises* para o Caso 1 às 7h e 17h na região de interesse mostrada na Figura 6.2. Nota-se uma grande compressão na região do rejunte com a cerâmica principalmente às 17h e, como consequência, um nível mais elevado de concentração de tensão, também, na vizinhança do rejunte.

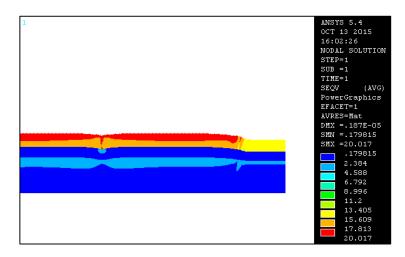


Figura 6.14 - Caso 1: Tensão de Von Mises às 7h.

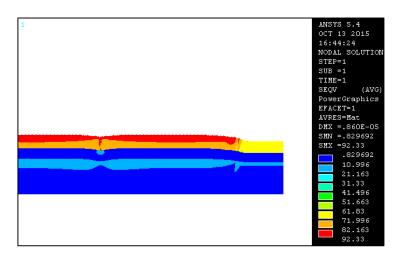


Figura 6.15 - Caso 1: Tensão de Von Mises às 17h.

6.1.1.7 Análise de Fadiga do Caso 1

As maiores e menores tensões principais S_1 e S_2 na argamassa colante industrializada e na argamassa de emboço para o Caso 1 estão mostradas na Tabela 6.7 e foram extraídas das Tabelas 6.5 e 6.6, respectivamente.

Tabela 6.7 - Caso 1: Tensões para o cálculo de fadiga na argamassa colante industrializada ACII e argamassa de emboço.

TENSÕES PRINCIPAIS PARA ACII			
$S_{1m\acute{a}x} = -0.4164$	$\Delta S=S_{1m\acute{a}x}-S_{1m\acute{n}}=-0,37MPa \Rightarrow Figura 5.6 \Rightarrow \Delta S < S_{comp}=4,83 MPa.$		
$S_{1min} = -0.0420$	Não há risco de ruptura por fadiga. $\rightarrow N \approx 10^{10,30}$ ou seja, N $\rightarrow \infty$		
$S_{2m\acute{a}x} = -1,5676$	$\Delta S = S_{2m\acute{a}x} - S_{2m\acute{n}n} = -1,35 MPa \rightarrow Figura 5.6 \rightarrow \Delta S < S_{comp} = 4,83 MPa.$		
$S_{2min} = -0.2189$	Não há risco de ruptura por fadiga. $\rightarrow N \approx 10^{9,36}$ ou seja, N $\rightarrow \infty$		
TENSÕES PRINCIPAIS PARA ARGAMASSA DE EMBOÇO			
1 E	NSOES PRINCIPAIS PARA ARGAMASSA DE EMBOÇO		
$S_{1\text{máx}} = -0.3226$	NSOES PRINCIPAIS PARA ARGAMASSA DE EMBOÇO $\Delta S = S_{1\text{máx}} - S_{1\text{mín}} = -0.30 \text{MPa} \rightarrow \text{Figura } 5.10 \rightarrow \Delta S < S_{\text{comp}} = 1,70 \text{ MPa}.$		
	<u> </u>		
$S_{1m\acute{a}x} = -0.3226$	$\Delta S = S_{1 \text{máx}} - S_{1 \text{mín}} = -0.30 \text{MPa} \rightarrow \text{Figura } 5.10 \rightarrow \Delta S < S_{\text{comp}} = 1.70 \text{ MPa}.$		

A Tabela 6.7 mostra as variações das tensões principais S_1 e S_2 com seus respectivos valores máximos e mínimos para o cálculo da fadiga na argamassa colante industrializada e argamassa de emboço para o Caso 1. Como o valor da variação das tensões principais S_1 e S_2

é menor que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), no caso, 4,83MPa para a argamassa colante industrializada ACII e 1,70MPa para a argamasse de emboço, conclui-se que não existe risco de ruptura por fadiga para o Caso 1: cerâmica clara e temperatura interna (t_i) de 18°C.

6.1.2 Caso-2

6.1.2.1 Análise da Tensão Normal S_x

A Figura 6.16 apresenta o gráfico da variação da tensão S_x às 7h e 17h para o Caso 2 (cerâmica clara e temperatura interna de 25°C). Observa-se que em todos os nós do modelo ocorre tensões S_x de tração às 7h e tensões S_x de compressão às 17h. Esse comportamento da tensão S_x no Caso 2 ocorre devido à temperatura interna do ambiente, no caso, 25°C, ser maior do que no Caso 1 (18°C) e devido à influência da condição de contorno de confinamento adotada no eixo "x". Os valores obtidos para a tensão S_x nos horários de 7h e 17h para o Caso 2 estão apresentados na Tabela 6.8.

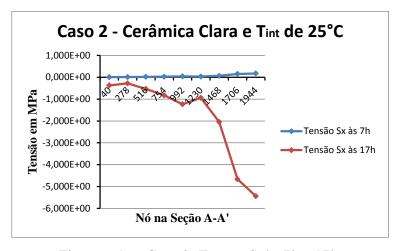


Figura 6.16 - Caso 2: Tensão S_x às 7h e 17h.

Tabela 6.8 - Caso 2: Tensão S_x nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S_x às	Tensão S _x às
CAMADA	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	1,215E-03	-0,3741
Emboço	278	8,619E-03	-0,2790
Emboço	516	1,656E-02	-0,5356
Emboço	754	2,562E-02	-0,8252
Interface E/AC	992	3,866E-02	-1,2367
Argamassa Colante	1230	2,957E-02	-0,9403
Interface AC/C	1468	6,456E-02	-2,0457
Cerâmica	1706	1,475E-01	-4,6608
Cerâmica	1944	1,726E-01	-5,4386

As Figuras 6.17 e 6.18 representam a tensão S_x atuando no sistema de revestimento cerâmico Caso 2 pelo MEF às 7h e 17h, respectivamente.

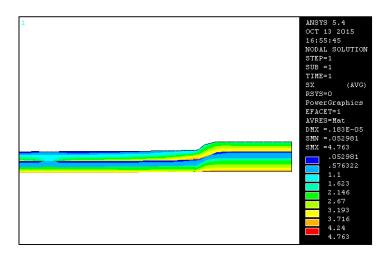


Figura 6.17 - Caso 2: Tensão S_x do modelo numérico às 7h.

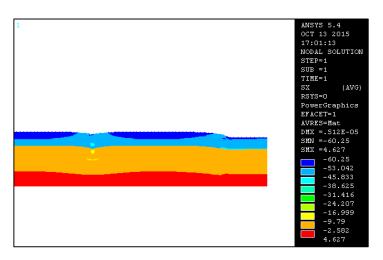


Figura 6.18 - Caso 2: Tensão S_x do modelo numérico às 17h.

6.1.2.2 Análise da Tensão Normal S_y

A Figura 6.19 apresenta o gráfico da variação da tensão S_y às 7h e 17h para o Caso 2. Nesse caso, às 17h observam-se tensões S_y de tração nos nós 1706 e 1944 que representam a camada de cerâmica e, nos demais nós do modelo, ocorre tensão S_y de compressão. Às 7h, observa-se o contrário, ou seja, tensões S_y de compressão nos nós 1706 e 1944 que representam a camada de cerâmica e, nos demais nós do modelo, ocorre tensão S_y de tração com valores bem pequenos, próximos de zero, conforme é ilustrado na Figura 6.19. Os valores obtidos para a tensão S_y nos horários de 7h e 17h para o Caso 2 estão apresentados na Tabela 6.9.

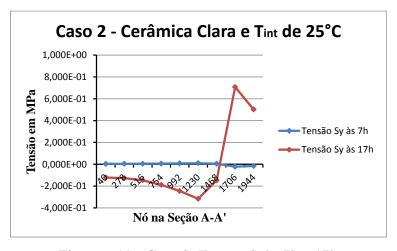


Figura 6.19 - Caso 2: Tensão S_y às 7h e 17h.

Tabela 6.9 - Caso 2: Tensão S_y nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S _y às	Tensão S _y às
	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	3,842E-03	-0,1213
Emboço	278	4,025E-03	-0,1270
Emboço	516	4,644E-03	-0,1466
Emboço	754	5,982E-03	-0,1887
Interface E/AC	992	7,762E-03	-0,2449
Argamassa Colante	1230	1,003E-02	-0,3161
Interface AC/C	1468	4,711E-03	-0,1473
Cerâmica	1706	-2,235E-02	0,7074
Cerâmica	1944	-1,591E-02	0,5021

As Figuras 6.20 e 6.21 representam a tensão S_y atuando no sistema de revestimento cerâmico Caso 2 pelo MEF às 7h e 17h, respectivamente.

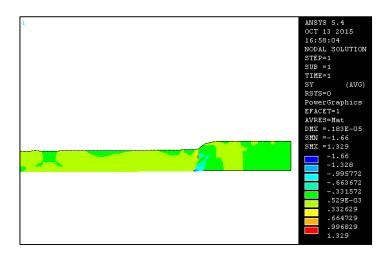


Figura 6.20 - Caso 2: Tensão S_y do modelo numérico às 7h.

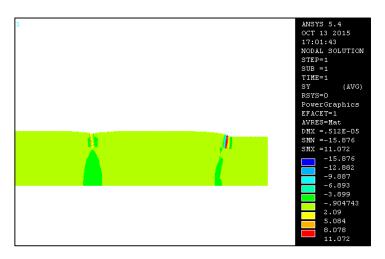


Figura 6.21 - Caso 2: Tensão S_y do modelo numérico às 17h.

6.1.2.3 Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}

A Figura 6.22 mostra o comportamento das tensões de cisalhamento S_{xy} para o Caso 2 nos nós do modelo numérico do sistema de revestimento cerâmico considerando o transiente térmico às 7h e 17h do dia. Os valores das tensões S_{xy} são apresentados na Tabela 6.10.

O gráfico da Figura 6.22 ilustra que as tensões S_{xy} ocorridas tanto às 7h quanto às 17h foram muito pequenas e bem próximas de zero. Pelos valores coletados de tensão S_{xy} conforme apresentado na Tabela 6.10. As tensões de cisalhamento são provocadas pela deformação na cerâmica causada pela temperatura externa do ambiente.

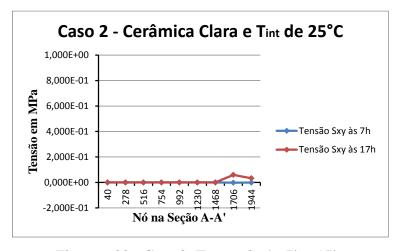


Figura 6.22 - Caso 2: Tensão S_{xy} às 7h e 17h.

Tabela 6.10 - Caso 2: Tensão S_{xy} nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S _{xy} às	Tensão S _{xy} às
CAMADA	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	1,420E-07	4,847E-06
Emboço	278	-5,506E-07	1,880E-05
Emboço	516	-1,015E-06	3,470E-05
Emboço	754	-1,326E-06	4,544E-05
Interface E/AC	992	-1,441E-06	4,949E-05
Argamassa Colante	1230	-1,363E-06	4,706E-05
Interface AC/C	1468	-1,167E-06	4,057E-05
Cerâmica	1706	-1,846E-03	5,996E-02
Cerâmica	1944	-1,034E-03	3,332E-02

As Figuras 6.23 e 6.24 representam a tensão cisalhamento S_{xy} atuando no sistema de revestimento cerâmico Caso 2 pelo MEF às 7h e 17h, respectivamente.

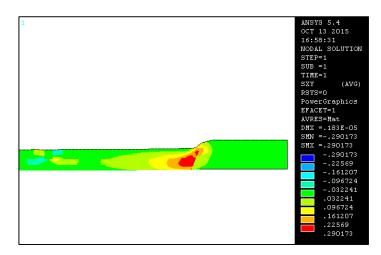


Figura 6.23 - Caso 2: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 7h.

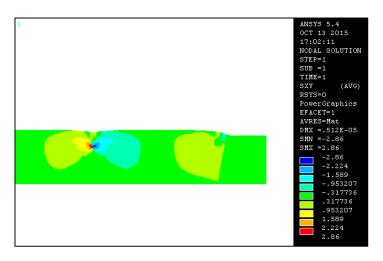


Figura 6.24 - Caso 2: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 17h.

6.1.2.4 Análise da Tensão Principal S₁

A Figura 6.25 mostra o gráfico das variações da tensão principal S₁ às 7h e 17h para o Caso 2. Observa-se a predominância de tensão à tração às 7h em todos os nós do modelo e às 17h nos nós 1706 e 1944 que representam a camada cerâmica. Já no interior do modelo do sistema de revestimento cerâmico (nós 40 até 1468) observa-se a ocorrência de tensão principal S₁ de compressão. O maior valor de tensão à tração foi de 0,7081MPa no nó 1706 às 17h. Os valores da tensão principal S₁ às 7h e 17h para o Caso 2 estão apresentados na Tabela 6.11.

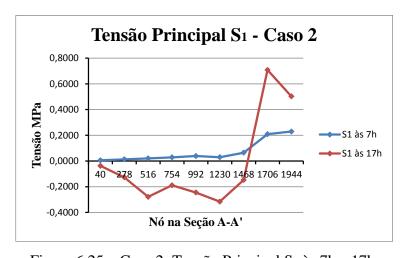


Figura 6.25 – Caso 2: Tensão Principal S_1 às 7h e 17h.

Tabela 6.11 – Caso 2: Tensão Principal S₁ nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S ₁ às	Tensão S ₁ às
	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	0,0054	-0,0374
Emboço	278	0,0127	-0,1270
Emboço	516	0,0203	-0,2790
Emboço	754	0,0282	-0,1887
Interface E/AC	992	0,0387	-0,2449
Argamassa Colante	1230	0,0296	-0,3161
Interface AC/C	1468	0,0646	-0,1473
Cerâmica	1706	0,2089	0,7081
Cerâmica	1944	0,2294	0,5023

6.1.2.5 Análise da Tensão Principal S₂

A Figura 6.26 ilustra o gráfico das variações da tensão principal S_2 às 7h e 17h para o Caso 2. Observa-se que, em todos os nós do modelo, às 7h ocorre tensão à tração e às 17h registra-se tensão à compressão. O maior valor de tensão à compressão foi de -5,4388MPa no nó 1944 às 17h e, o maior valor de tensão à tração foi de 0,1726MPa no mesmo nó 1944 às 7h. Os valores da tensão principal S_2 às 7h e 17h para o Caso 2 estão apresentados na Tabela 6.12.

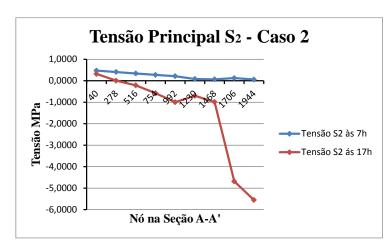


Figura 6.26 – Caso 2: Tensão Principal S₂ às 7h e 17h.

Tabela 6.12 – Caso 2: Tensão Principal S₂ nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S2 às	Tensão S2 às
		7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	0,0038	-0,1213
Emboço	278	0,0086	-0,2790
Emboço	516	0,0166	-0,5356
Emboço	754	0,0256	-0,8252
Interface E/AC	992	0,0371	-0,6241
Argamassa Colante	1230	0,0240	-0,7643
Interface AC/C	1468	0,0323	-1,0237
Cerâmica	1706	0,1475	-4,6614
Cerâmica	1944	0,1726	-5,4388

6.1.2.6 Deformada e Concentrada de Tensão

As Figuras 6.27 e 6.28 representam a deformada e a tensão equivalente de *Von Mises* para o Caso 2 às 7h e 17h, respectivamente, na região de interesse mostrada na Figura 6.2. Nota-se uma grande compressão de tração na região do rejunte com a cerâmica às 17h e, como consequência, um nível mais elevado de deformação na vizinhança do rejunte.

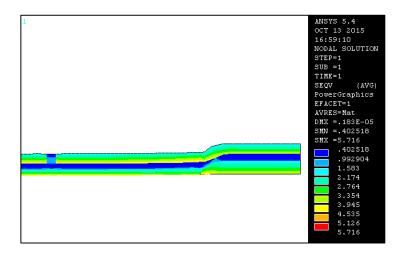


Figura 6.27 - Caso 2: Tensão de Von Mises às 7h.

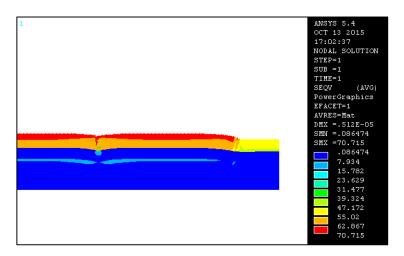


Figura 6.28 - Caso 2: Tensão de Von Mises às 17h.

6.1.2.7 Análise de Fadiga do Caso 2

As maiores e menores tensões principais S_1 e S_2 na argamassa colante industrializada e na argamassa de emboço para o Caso 2 estão mostradas na Tabela 6.13 e foram extraídas das Tabelas 6.11 e 6.12, respectivamente.

Tabela 6.13 – Caso 2: Tensões para o cálculo de fadiga na argamassa colante industrializada ACII e argamassa de emboço.

TENSÕES PRINCIPAIS PARA ACII			
$S_{1\text{máx}} = 0,0646$	$\Delta S=S_{1m\acute{a}x}-S_{1m\acute{n}}=-0.38MPa$ \rightarrow Figura 5.6 \rightarrow $\Delta S MPa$		
$S_{1min} = -0.3161$	Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{10,29}$ ou seja, N $\rightarrow \infty$		
$S_{2m\acute{a}x} = 0,0371$	$\Delta S=S_{2m\acute{a}x}-S_{2m\acute{n}}=-1,06MPa \rightarrow Figura 5.6 \rightarrow \Delta S < S_{Comp}=4,83MPa$		
$S_{2min} = -1,0237$	Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{9,64}$ ou seja, N $\rightarrow \infty$		
TENSÕES PRINCIPAIS PARA ARGAMASSA DE EMBOÇO			
$S_{1\text{máx}} = 0,0387$	$\Delta S=S_{1\text{máx}}-S_{1\text{mín}}=-0.32\text{MPa} \rightarrow \text{Figura } 5.10 \rightarrow \Delta S < S_{\text{Comp}} = 1,70 \text{ MPa}$		
	- Comp		
$S_{1min} = -0.2790$	Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{8,88}$ ou seja, N $\rightarrow \infty$		
$S_{1min} = -0,2790$ $S_{2max} = 0,0371$	- -		

A Tabela 6.13 mostra as variações das tensões principais S_1 e S_2 com seus respectivos valores máximos e mínimos para o cálculo da fadiga na argamassa colante industrializada e argamassa de emboço para o Caso 2. Como o valor da variação das tensões principais S_1 e S_2

é menor que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), no caso, 4,83MPa para a argamassa colante industrializada ACII e 1,70MPa para a argamasse de emboço, conclui-se que não existe risco de ruptura por fadiga para o Caso 2: cerâmica clara e temperatura interna (t_i) de 25°C.

6.1.3 Caso-3

6.1.3.1 Análise da Tensão Normal S_x

A Figura 6.29 mostra os valores da tensão S_x nos horários de 7h e 17h para o Caso 3 (cerâmica escura e temperatura interna de 18°C) e, podemos observar que todas as tensões S_x no modelo são de compressão. A tensão S_x para o Caso 3 tem comportamento semelhante ao Caso 1. Observa-se que a tensão S_x , tanto às 7h quanto às 17h, é próxima de zero no nó 40 (interface substrato/emboço), mas nos nós 1706 e 1944 (cerâmica) há uma evidente variação de tensão S_x à compressão entre 7h e 17h, variando de -1,3321MPa até -10,5770MPa. Isso ocorre devido ao índice de absorção e ao módulo de elasticidade da cerâmica escura e, também, à condição de contorno de confinamento no eixo "x", chegando a uma tensão de compressão de -10,5770MPa. A Tabela 6.14 representa os valores de tensão normal S_x do Caso 3 considerando os horários do dia às 7h e 17h.

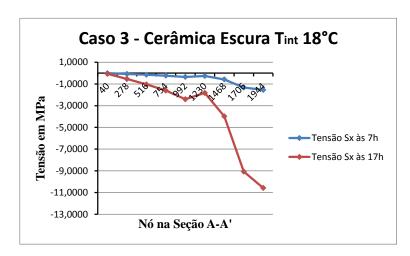


Figura 6.29 - Caso 3: Tensão S_x às 7h e 17h.

Tabela 6.14 - Caso 3: Tensão S_x nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S_x às	Tensão S _x às
		7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	-0,0105	-0,0720
Emboço	278	-0,0802	-0,5428
Emboço	516	-0,1540	-1,0427
Emboço	754	-0,2370	-1,6063
Interface E/AC	992	-0,3546	-2,4069
Argamassa Colante	1230	-0,2692	-1,8295
Interface AC/C	1468	-0,5851	-3,9795
Cerâmica	1706	-1,3321	-9,0654
Cerâmica	1944	-1,5531	-10,5770

As Figuras 6.30 e 6.31 representam a tensão S_x atuando no sistema de revestimento cerâmico Caso 3 pelo MEF às 7h e 17h, respectivamente.

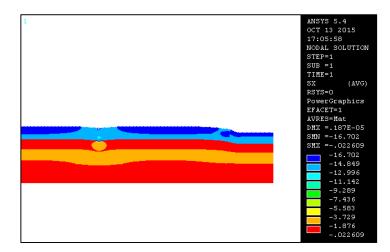


Figura 6.30 - Caso 3: Tensão S_x do modelo numérico às 7h.

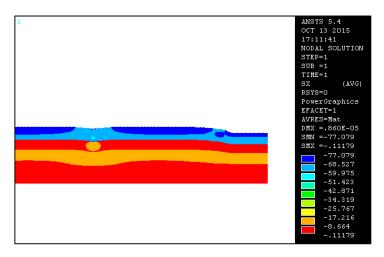


Figura 6.31 - Caso 3: Tensão S_x do modelo numérico às 17h.

6.1.3.2 Análise da Tensão Normal S_y

Os resultados obtidos da tensão normal ao longo do eixo "y" (S_y) no Caso 3 às 7h e 17h do dia para os nós do modelo numérico que representam o sistema de revestimento cerâmico são mostrados na Figura 6.32 e na Tabela 6.15.

Observa-se na Figura 6.32 que nos nós 1706 e 1944, que representam a cerâmica e a interface cerâmica/rejunte, os valores da tensão S_y são de tração às 7h e 17h. Isso ocorre devido à condição de contorno imposta ao sistema de análise, ou seja, não há confinamento no eixo "y", variando a tensão S_y de 1,435E-01MPa até 1,3762MPa. Observa-se, também, que nos demais nós do modelo, ou seja, entre a interface da cerâmica/argamassa colante industrializada/emboço os valores da tensão S_y , se comportam como tensão de compressão devido ao confinamento entre as interfaces com valores variando de -9,028E-02MPa até -0,6147MPa no nó 1230 (argamassa colante industrializada).

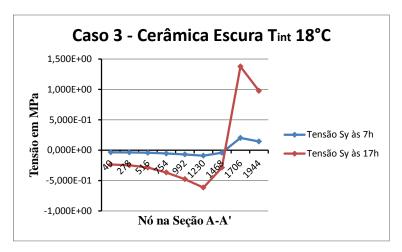


Figura 6.32 - Caso 3: Tensão S_y às 7h e 17h.

Tabela 6.15 - Caso 3: Tensão S_y nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S _y às	Tensão S _y às
		7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	-3,465E-02	-0,2358
Emboço	278	-3,629E-02	-0,2471
Emboço	516	-4,187E-02	-0,2850
Emboço	754	-5,392E-02	-0,3671
Interface E/AC	992	-6,996E-02	-0,4763
Argamassa Colante	1230	-9,028E-02	-0,6147
Interface AC/C	1468	-4,197E-02	-0,2863
Cerâmica	1706	2,023E-01	1,3762
Cerâmica	1944	1,435E-01	0,9767

As Figuras 6.33 e 6.34 representam a tensão S_y atuando no sistema de revestimento cerâmico Caso 3 pelo MEF às 7h e 17h, respectivamente.

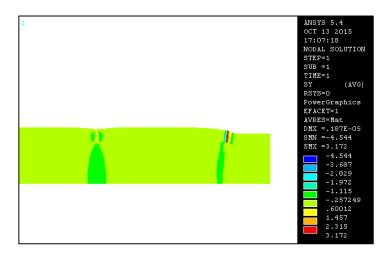


Figura 6.33 - Caso 3: Tensão S_y do modelo numérico às 7h.

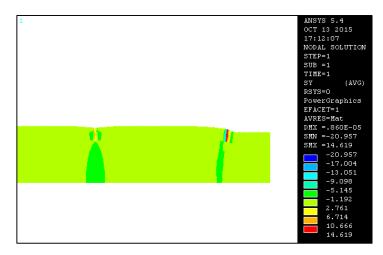


Figura 6.34 - Caso 3: Tensão S_y do modelo numérico às 17h.

6.1.3.3 Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}

A Figura 6.35 ilustra o comportamento das tensões de cisalhamento S_{xy} para o Caso 3 nos nós do modelo numérico do sistema de revestimento cerâmico considerando as temperaturas às 7h e 17h do dia. Os valores das tensões S_{xy} são apresentados na Tabela 6.16.

Observa-se pelo gráfico da Figura 6.35 que as tensões S_{xy} ocorridas tanto às 7h quanto às 17h foram muito pequenas e bem próximas de zero. Pelos valores coletados de tensão S_{xy} conforme apresentado na Tabela 6.16, observa-se que existe predominância de tensão nos nós do modelo às 7h e 17h, exceto no nó 1706 (cerâmica) às 17h onde ocorreu tensão. A maior variação de tensão de cisalhamento S_{xy} entre 7h e 17h para o Caso 3 ocorreu no nó

1706, com as tensões registradas de 1,725E-02MPa às 7h e de -1,168E-01MPa às 17h, isso ocorre devido a deformação provocada pela temperatura na cerâmica escura.

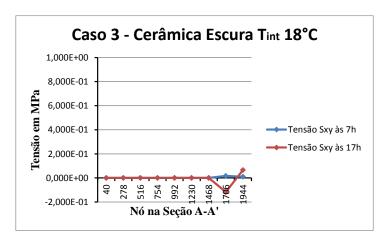


Figura 6.35 - Caso 3: Tensão S_{xy} às 7h e 17h.

Tabela 6.16 - Caso 3: Tensão S_{xy} nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S _{xy} às	Tensão S _{xy} às
		7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	1,409E-06	9,441E-06
Emboço	278	5,464E-06	3,662E-05
Emboço	516	1,009E-05	6,758E-05
Emboço	754	1,322E-05	8,850E-05
Interface E/AC	992	1,440E-05	9,639E-05
Argamassa Colante	1230	1,371E-05	9,167E-05
Interface AC/C	1468	1,183E-05	7,903E-05
Cerâmica	1706	1,725E-02	-1,168E-01
Cerâmica	1944	9,586E-03	6,491E-02

As Figuras 6.36 e 6.37 representam as tensões S_{xy} no sistema de revestimento cerâmico Caso 3 do MEF às 7h e 17h.

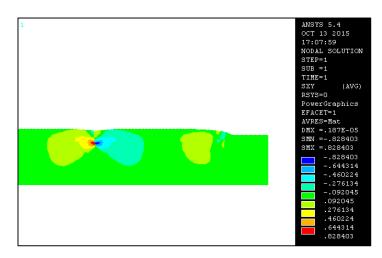


Figura 6.36 - Caso 3: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 7h.

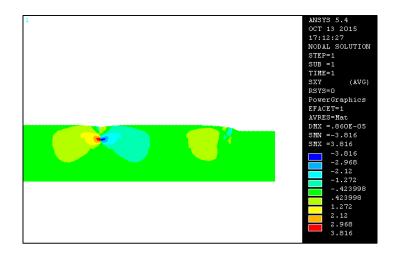


Figura 6.37 - Caso 3: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 17h.

6.1.3.4 Análise da Tensão Principal S₁

A Figura 6.38 mostra as variações da tensão principal S₁ para o Caso 3. Nos nós 1706 e 1944 que representam a cerâmica ocorre tensão à tração variando de 0,1436MPa até 1,3775MPa. Na parte interna do sistema de revestimento cerâmico representado pelo nó 40 até o nó 1468 observa-se que ocorre tensão à compressão variando de -0,0105MPa até -0,6147MPa como mostrado na Tabela 6.17. Isso ocorre por causa da incidência solar (I_g) que gera tensão de tração na seção externa do revestimento e compressão na parte interna do mesmo.

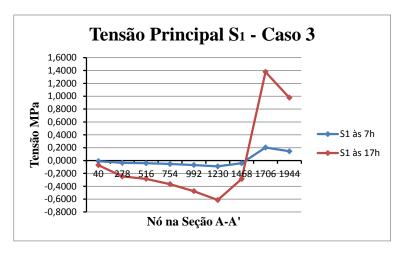


Figura 6.38 – Caso 3 - Tensão Principal S₁ às 7h e 17h

Tabela 6.17 – Caso 3: Tensão Principal S₁ nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S ₁ às	Tensão S ₁ às
CAMADA	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	-0,0105	-0,0720
Emboço	278	-0,0363	-0,2471
Emboço	516	-0,0419	-0,2850
Emboço	754	-0,0539	-0,3671
Interface E/AC	992	-0,0700	-0,4763
Argamassa Colante	1230	-0,0903	-0,6147
Interface AC/C	1468	-0,0420	-0,2863
Cerâmica	1706	0,2025	1,3775
Cerâmica	1944	0,1436	0,9771

6.1.3.5 Análise da Tensão Principal S₂

A Figura 6.39 mostra as variações da tensão principal S₂ atuando no sistema de revestimento cerâmico Caso 3 e que corresponde, exclusivamente, a uma tensão de compressão em todos os nós do modelo. Devido há incidência da radiação solar, o maior valor de tensão principal S₂ à compressão ocorre na superfície do revestimento cerâmico (nó 1944) e é de - 10,5770MPa, conforme mostrado na Tabela 6.18.

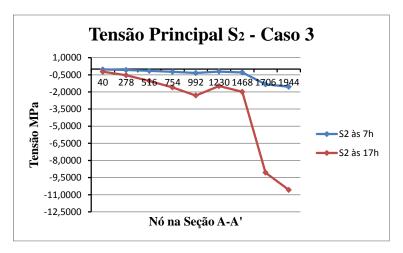


Figura 6.39 – Caso 3: Tensão Principal S₂ às 7h e 17h.

Tabela 6.18 – Caso 3: Tensão Principal S₂ nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S2 às	Tensão S2 às
CAMADA	NU	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	-0,0346	-0,2358
Emboço	278	-0,0802	-0,5428
Emboço	516	-0,1540	-1,0427
Emboço	754	-0,0237	-1,6063
Interface E/AC	992	-0,0341	-2,3148
Argamassa Colante	1230	-0,0219	-1,4871
Interface AC/C	1468	-0,0293	-1,9914
Cerâmica	1706	-1,3323	-9,0667
Cerâmica	1944	-1,5532	-10,5770

6.1.3.6 Deformada e Concentrada de Tensão

As Figuras 6.40 e 6.41 representam as tensões equivalentes de *Von Mises* no sistema de revestimento cerâmico Caso 3 às 7h e 17h, conforme nós da seção A-A₁ da região estudada e ilustrada na Figura 6.2. Nota-se uma grande compressão na região do rejunte com a cerâmica e, como consequência, um nível mais elevado de concentração de tensão, também, na vizinhança do rejunte.

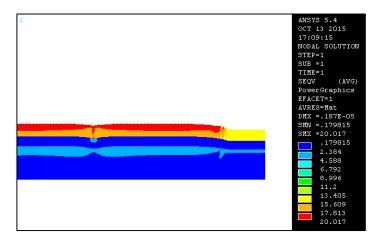


Figura 6.40 - Caso 3: Tensão de Von Mises às 7h.

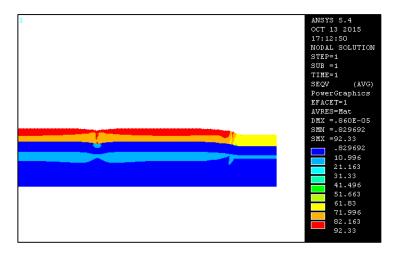


Figura 6.41 - Caso 3: Tensão de Von Mises às 17h.

6.1.3.7 Análise de Fadiga do Caso 3

As maiores e menores tensões principais S_1 e S_2 na argamassa colante industrializada e na argamassa de emboço para o Caso 3 estão mostradas na Tabela 6.19 e foram extraídas das Tabelas 6.17 e 6.18, respectivamente.

Tabela 6.19 – Caso 3: Tensões para o cálculo da fadiga na argamassa colante

industrializada ACII e argamassa de emboço.

TENSÕES PRINCIPAIS PARA ACII			
$S_{1\text{máx}} = -0,6147$	$\Delta S=S_{1\text{máx}}-S_{1\text{mín}}=-0.54\text{MPa} \rightarrow \text{Figura } 5.6 \rightarrow \Delta S < S_{\text{comp}}=4,83\text{MPa}$		
$S_{1min} = -0.0700$	Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{10,13}$ ou seja, N $\rightarrow \infty$		
$S_{2m\acute{a}x} = -2,3148$	$\Delta S=S_{2m\acute{a}x}-S_{2m\acute{n}}=-2,30MPa \Rightarrow Figura 5.6 \Rightarrow \Delta S< S_{comp}=4,83 MPa$		
$S_{2min} = -0.0219$	Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{8,44}$ ou seja, N $\rightarrow \infty$		
TENS	SÕES PRINCIPAIS PARA ARGAMASSA DE EMBOÇO		
$S_{1m\acute{a}x} = -0,4763$	$\Delta S=S_{1\text{máx}}-S_{1\text{mín}}=-0.47\text{MPa} \rightarrow \text{Figura } 5.10 \rightarrow \Delta S < S_{\text{comp}}=1,70\text{MPa}$		
$S_{1min} = -0.0105$	Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{8,52}$ ou seja, N $\rightarrow \infty$		
$S_{2m\acute{a}x} = -2,3148$	$\Delta S=S_{2m\acute{a}x}-S_{2m\acute{n}}=-2,30MPa \Rightarrow Figura 5.10 \Rightarrow \Delta S>S_{comp}=1,70 MPa$		
$S_{2min} = -0.0237$	Há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{3,08}$, ou seja, rompe com 3		
2 2 mm	anos e 3 meses, considerando 1(um) ciclo por dia.		

A Tabela 6.19 mostra as variações das tensões principais S_1 e S_2 com seus respectivos valores máximos e mínimos para o cálculo da fadiga na argamassa colante industrializada e argamassa de emboço para o Caso 3. Como a variação da tensão principal S_1 e S_2 na argamassa colante industrializada ACII e a variação da tensão principal S_1 na argamassa de emboço são menores que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), no caso, 4,83MPa para a argamassa colante industrializada ACII e 1,70MPa para a argamassa de emboço, conclui-se que não existe risco de ruptura por fadiga na argamassa colante industrializada ACII para o Caso 3: cerâmica escura e temperatura interna (t_i) de 18°C. Já a variação da tensão principal S_2 na argamassa de emboço é maior que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), portanto, essa camada sofrerá ruptura por fadiga após 3 anos e 3 meses depois de sua aplicação.

6.1.4 Caso-4

6.1.4.1 Análise da Tensão Normal S_x

A Figura 6.42 apresenta o gráfico da variação da tensão S_x às 7h e 17h para o Caso 4 (cerâmica escura e temperatura interna de 25°C). De forma semelhante ao Caso 2, observase que em todos os nós do modelo ocorre tensões S_x de tração às 7h e tensões S_x de

compressão às 17h. Esse comportamento da tensão S_x no Caso 4 ocorre devido à temperatura interna do ambiente, no caso, 25°C, ao baixo valor do módulo de elasticidade da argamassa colante e à influência da condição de contorno de confinamento adotada no eixo "x". Os valores obtidos para a tensão S_x nos horários de 7h e 17h para o Caso 4 estão apresentados na Tabela 6.20.

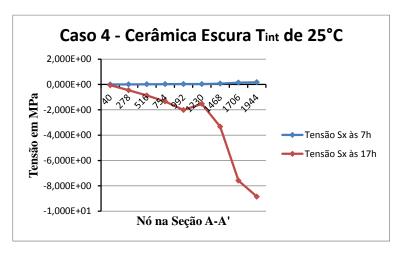


Figura 6.42 - Caso 4: Tensão S_x às 7h e 17h.

Tabela 6.20 - Caso 4: Tensão S_x nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S _x às	Tensão S _x às
CAMADA	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	1,215E-03	-0,0603
Emboço	278	8,619E-03	-0,4540
Emboço	516	1,656E-02	-0,8722
Emboço	754	2,562E-02	-1,3437
Interface E/AC	992	2,908E-02	-2,0136
Argamassa Colante	1230	2,957E-02	-1,5308
Interface AC/C	1468	6,456E-02	-3,3298
Cerâmica	1706	1,475E-01	-7,5858
Cerâmica	1944	1,726E-01	-8,8508

As Figuras 6.43 e 6.44 representam a tensão normal S_x atuando no sistema de revestimento cerâmico Caso 4 pelo MEF às 7h e 17h, respectivamente.

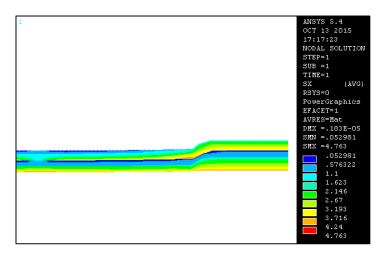


Figura 6.43 - Caso 4: Tensão S_x do modelo numérico às 7h.

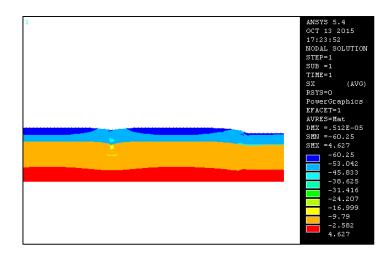


Figura 6.44 - Caso 4: Tensão S_x do modelo numérico às 17h.

6.1.4.2 Análise da Tensão Normal S_y

A Figura 6.45 apresenta o gráfico da variação da tensão S_y às 7h e 17h para o Caso 4. Nesse caso, às 17h observam-se tensões S_y de tração nos nós 1706 e 1944 que representam a camada de cerâmica e, nos demais nós do modelo, ocorre tensão S_y de compressão. Entretanto, às 7h, observa-se o contrário, ou seja, tensões S_y de compressão nos nós 1706 e 1944 que representam a camada de cerâmica e, nos demais nós do modelo, ocorre tensão S_y de tração com valores bem pequenos, próximos de zero, conforme é ilustrado na Figura 6.45. Esse comportamento da variação da tensão S_y para o Caso 4 é semelhante ao obtido para o Caso 2. Os valores obtidos para a tensão S_y nos horários de 7h e 17h para o Caso 4 estão apresentados na Tabela 6.21.

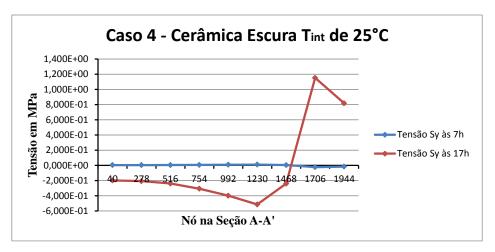


Figura 6.45 - Caso 4: Tensão S_y às 7h e 17h.

Tabela 6.21 - Caso 4: Tensão S_y nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S _y às	Tensão S _y às
CAMADA	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	3,842E-03	-0,1974
Emboço	278	4,025E-03	-0,2067
Emboço	516	4,644E-03	-0,2385
Emboço	754	5,982E-03	-0,3072
Interface E/AC	992	8,952E-03	-0,3985
Argamassa Colante	1230	1,003E-02	-0,5144
Interface AC/C	1468	4,711E-03	-0,2396
Cerâmica	1706	-2,235E-02	1,1515
Cerâmica	1944	-1,591E-02	0,8173

As Figuras 6.46 e 6.47 representam a tensão S_y atuando no sistema de revestimento cerâmico Caso 4 pelo MEF às 7h e 17h, respectivamente.

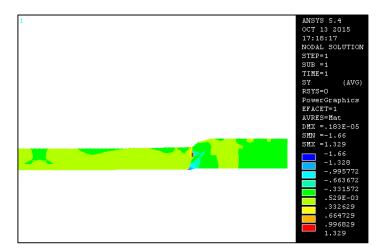


Figura 6.46 - Caso 4: Tensão S_y do modelo numérico às 7h.

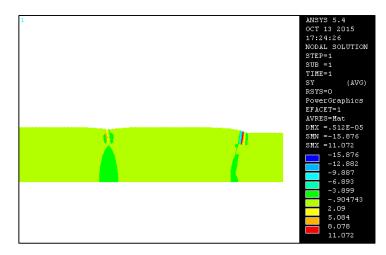


Figura 6.47 - Caso 4: Tensão S_y do modelo numérico às 17h.

6.1.4.3 Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}

A Figura 6.48 mostra o comportamento das tensões de cisalhamento S_{xy} para o Caso 4 nos nós do modelo numérico do sistema de revestimento cerâmico considerando o transiente térmico às 7h e 17h do dia. Os valores das tensões S_{xy} são apresentados na Tabela 6.22.

O gráfico da Figura 6.48 ilustra que as tensões S_{xy} ocorridas tanto às 7h quanto às 17h foram muito pequenas e bem próximas de zero. Pelos valores coletados de tensão S_{xy} conforme apresentado na Tabela 6.22. Esse comportamento é semelhante ao obtido no Caso 2 para as tensões de cisalhamento S_{xy} . Entretanto, no Caso 4 observa-se que as tensões são maiores do que no Caso 2 em função do alto índice de absorção térmica da cerâmica escura.

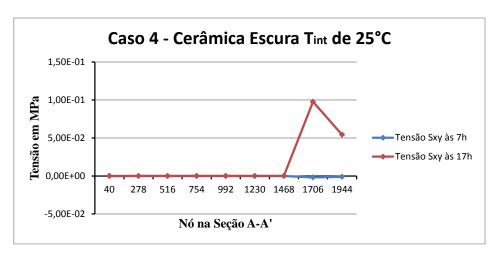


Figura 6.48 - Caso 4: Tensão S_{xy} às 7h e 17h.

Tabela 6.22 - Caso 4: Tensão S_{xy} nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S_{xy} às	Tensão S _{xy} às
CAMADA	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	-1,42E-07	7,890E-06
Emboço	278	-5,51E-07	3,060E-05
Emboço	516	-1,01E-06	5,647E-05
Emboço	754	-1,33E-06	7,396E-05
Interface E/AC	992	-1,44E-06	8,055E-05
Argamassa Colante	1230	-1,36E-06	7,660E-05
Interface AC/C	1468	-1,17E-06	6,603E-05
Cerâmica	1706	-1,85E-03	9,767E-02
Cerâmica	1944	-1,03E-03	5,429E-02

As Figuras 6.49 e 6.50 ilustram as tensões S_{xy} no sistema de revestimento cerâmico para o Caso 4 no MEF às 7h e 17h.

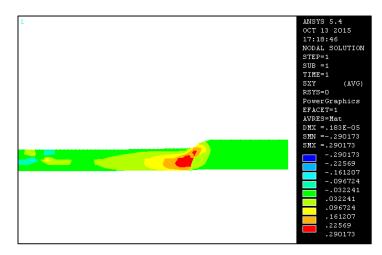


Figura 6.49 - Caso 4: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 7h.

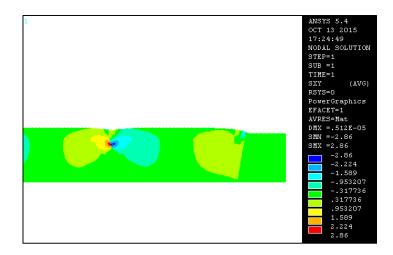


Figura 6.50 - Caso 4: Tensão S_{xy} do modelo numérico às 17h.

6.1.4.4 Análise da Tensão Principal S₁

A Figura 6.51 mostra o gráfico das variações da tensão principal S₁ às 7h e 17h para o Caso 4. Observa-se a predominância de tensão à tração às 7h em todos os nós do modelo e, ainda, às 17h nos nós 1706 e 1944 que representam a camada de cerâmica. Já no interior do modelo do sistema de revestimento cerâmico (nós 40 até 1468) às 17h observa-se a ocorrência de tensão principal S₁ de compressão. O maior valor de tensão à tração foi de 1,1526MPa no nó 1706 às 17h. Os valores da tensão principal S₁ às 7h e 17h para o Caso 4 estão apresentados na Tabela 6.23. Da mesma forma, o comportamento da tensão principal S₁ para o Caso 4 é semelhante ao do Caso 2, porém com valores de tensão maiores no Caso 4.

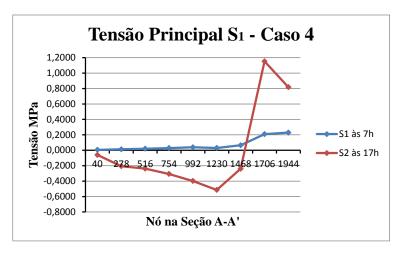


Figura 6.51 – Caso 4 Tensão Principal S₁ às 7h e 17h

Tabela 6.23 – Caso 4: Tensão Principal S₁ nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S ₁ às	Tensão S ₁ às
CAMADA	NU	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	0,0054	-0,0603
Emboço	278	0,0127	-0,2067
Emboço	516	0,0203	-0,2385
Emboço	754	0,0282	-0,3072
Interface E/AC	992	0,0387	-0,3985
Argamassa Colante	1230	0,0296	-0,5144
Interface AC/C	1468	0,0646	-0,2396
Cerâmica	1706	0,2089	1,1526
Cerâmica	1944	0,2294	0,8176

6.1.4.5 Análise da Tensão Principal S₂

A Figura 6.52 ilustra o gráfico das variações da tensão principal S₂ às 7h e 17h para o Caso 4. Observa-se que, em todos os nós do modelo, às 7h ocorre tensão à tração e às 17h registra-se tensão à compressão. O maior valor de tensão à compressão foi de -8,8511MPa no nó 1944 às 17h e, o maior valor de tensão à tração foi de 0,1726MPa no mesmo nó 1944 às 7h. Os valores obtidos da tensão principal S₂ às 7h para os Casos 2 e 4 foram iguais. E, de forma

geral, o comportamento da tensão principal S_2 para o Caso 4 é semelhante ao observado no Caso 2. A Tabela 6.24 apresenta os valores da tensão S_2 às 7h e 17h para o Caso 4.

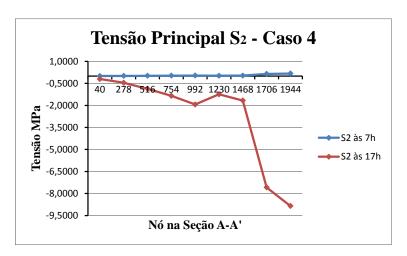


Figura 6.52 – Caso 4: Tensão Principal S_2 às 7h e 17h

Tabela 6.24 – Caso 4: Tensão Principal S₂ nos nós da estrutura do sistema de revestimento cerâmico.

CAMADA	NÓ	Tensão S2 às	Tensão S2 às
CAMADA	NO	7h (MPa)	17h (MPa)
Interface S/E	40	0,0038	-0,1974
Emboço	278	0,0086	-0,4540
Emboço	516	0,0166	-0,8722
Emboço	754	0,0256	-1,3437
Interface E/AC	992	0,0371	-1,9366
Argamassa Colante	1230	0,0240	-1,2443
Interface AC/C	1468	0,0323	-1,6663
Cerâmica	1706	0,1475	-7,5869
Cerâmica	1944	0,1726	-8,8511

6.1.4.6 Deformada e Concentrada de Tensão

As Figuras 6.53 e 6.54 representam a deformada e a tensão equivalente de *Von Mises* para o Caso 4 às 7h e 17h, respectivamente, na região de interesse mostrada na Figura 6.2. Nota-se uma grande compressão na região do rejunte com a cerâmica e, como consequência, um nível mais elevado de concentração de tensão, também, na vizinhança do rejunte.

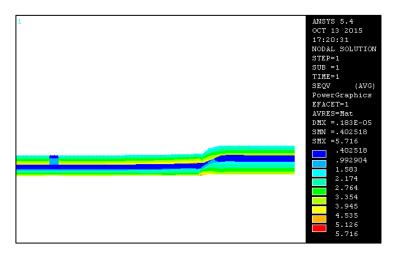


Figura 6.53 - Caso 4: Tensão de Von Mises às 7h

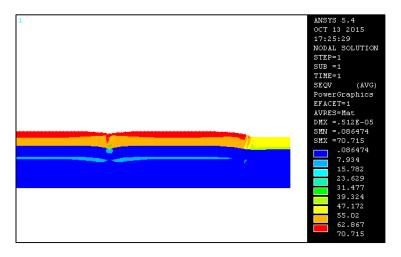


Figura 6.54 - Caso 4: Tensão de Von Mises às 17h.

6.1.4.7 Análise de Fadiga do Caso 4

As maiores e menores tensões principais S_1 e S_2 na argamassa colante industrializada e na argamassa de emboço para o Caso 4 estão mostradas na Tabela 6.25 e foram extraídas das Tabelas 6.23 e 6.24, respectivamente.

Tabela 6.25 – Caso 4: Tensões para o cálculo da fadiga na argamassa colante industrializada ACII e argamassa de emboço.

	TENSÕES PRINCIPAIS PARA ACII			
$S_{1m\acute{a}x} = 0,0646$	$\Delta S = S_{1\text{máx}} - S_{1\text{mín}} = -0.58 \text{MPa} \rightarrow \text{Figura } 5.6 \rightarrow \Delta S < S_{\text{comp}} = 4.83 \text{ MPa}.$			
$S_{1min} = -0.5144$	Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{10,10}$ ou seja, N $\rightarrow \infty$			
$S_{2m\acute{a}x} = 0.0371$	$\Delta S=S_{2m\acute{a}x}-S_{2m\acute{n}}=-1,97MPa \rightarrow Figura 5.6 \rightarrow \Delta S < S_{comp}=4,83 MPa$			
$S_{2min} = -1,9366$	Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{8,75}$ ou seja, N $\rightarrow \infty$			
	~			
TENS	SÕES PRINCIPAIS PARA ARGAMASSA DE EMBOÇO			
$\frac{\text{TENS}}{S_{1\text{máx}} = 0,0387}$	SÓES PRINCIPAIS PARA ARGAMASSA DE EMBOÇO $\Delta S = S_{1\text{máx}} - S_{1\text{mín}} = -0.44 \text{MPa} \rightarrow \text{Figura } 5.10 \rightarrow \Delta S < S_{\text{comp}} = 1,70 \text{ MPa}.$			
	,			
$S_{1máx} = 0.0387$	$\Delta S = S_{1\text{máx}} - S_{1\text{mín}} = -0.44 \text{MPa} \rightarrow \text{Figura } 5.10 \rightarrow \Delta S < S_{\text{comp}} = 1,70 \text{ MPa}.$			

A Tabela 6.25 mostra as variações das tensões principais S_1 e S_2 com seus respectivos valores máximos e mínimos para o cálculo da fadiga na argamassa colante industrializada e argamassa de emboço para o Caso 4. Como a variação da tensão principal S_1 e S_2 na argamassa colante industrializada ACII e a variação da tensão principal S_1 na argamassa de emboço são menores que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), no caso, 4,83MPa para a argamassa colante industrializada ACII e 1,70MPa para a argamassa de emboço, conclui-se que não existe risco de ruptura por fadiga na argamassa colante industrializada ACII para o Caso 4: cerâmica escura e temperatura interna (t_i) de 25°C. Entretanto, a variação da tensão principal S_2 na argamassa de emboço é maior que a sua tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), portanto, essa camada sofrerá ruptura por fadiga após 75 anos de sua aplicação.

.

7 ANÁLISE NUMÉRICA E ANALÍTICA DAS TEMPERATURAS

Para a análise numérica do transiente térmico vamos impor uma condição de contorno que está representada na Figura 7.1, com setas na parte superior e inferior do modelo, indicando imposição de temperatura dos transientes, conforme ilustrado nas Figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5 que apresentam a distribuição de temperaturas no interior do sistema de revestimento cerâmico às 17h para os quatro casos de estudo obtida via abordagem numérica. As regiões do revestimento equivalente do modelo são consideradas adiabáticas.

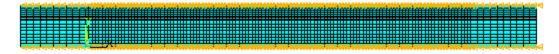


Figura 7.1 – Condição de contorno imposta para análise térmica no ANSYS.

A ação do transiente térmico ao longo do dia é demonstrada pelas variações das temperaturas nas interfaces das camadas do sistema de revestimento cerâmico. Neste trabalho foi considerada a temperatura mais crítica do dia 28/10/2008 em Brasília, conforme apresentado na Tabela 4.1, que corresponde às 17h, onde há maior troca de calor através das camadas do sistema de revestimento cerâmico.

O cálculo da temperatura superficial externa para a cerâmica clara (t_{extClara}) e escura (t_{extEscura}) ao longo do dia está apresentado no Apêndice A. Assim sendo, para a análise numérica do transiente térmico nas interfaces das camadas da estrutura de revestimento cerâmico foi utilizada a temperatura superficial externa (t_e) de 43,43°C para o Caso 1 e Caso 2 (cerâmica clara) e de 52,57°C para o Caso 3 e Caso 4 (cerâmica escura).

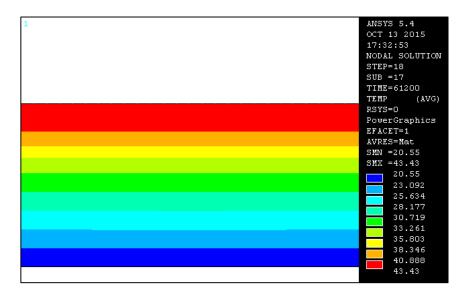


Figura 7.2 – Caso 1: Distribuição de temperatura no interior do sistema de revestimento cerâmico às 17h via método numérico.

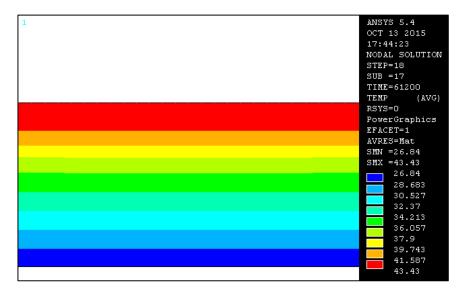


Figura 7.3 – Caso 2: Distribuição de temperatura no interior do sistema de revestimento cerâmico às17h via método numérico.

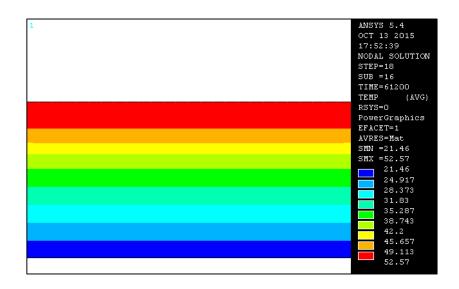


Figura 7.4 – Caso 3: Distribuição de temperatura no interior do sistema de revestimento cerâmico às 17h via método numérico.

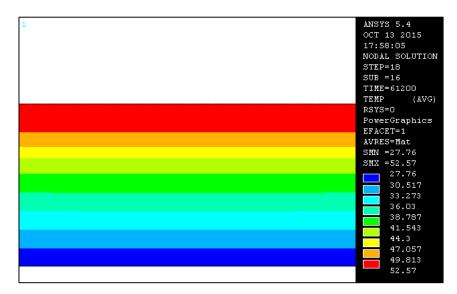


Figura 7.5 – Caso 4: Distribuição de temperatura no interior do sistema de revestimento cerâmico às 17h via método numérico.

Nas Figuras 7.2, 7.3, 7.4 e 7.5 observa-se que a temperatura máxima atingida nas superfícies externas (t_e) foi de 43,43°C para o Caso 1 e Caso 2 e de 52,57°C para o Caso 3 e Caso 4, definida em função do índice de absorção térmica da tonalidade da cerâmica. Entretanto, a variação da temperatura interna no revestimento cerâmico que ocorre devido à troca de calor por condução e depende da temperatura interna (t_i) imposta no estudo, teve sua máxima registrada conforme apresentado na Tabela 7.1.

Tabela /:1	Tabela 7.1 - Varia	ação da temperatura	interna (Δt) às 1	17h via método numérico
------------	--------------------	---------------------	-------------------	-------------------------

Casos	te	ts/R	$\Delta \mathbf{t}$
Caso 1	43,43°C	20,55°C	22,88°C
Caso 2	43,43°C	26,84°C	16,59°C
Caso 3	52,57°C	21,46°C	31,11°C
Caso 4	52,57°C	27,76°C	24,81°C

As Figuras 7.6(a) e (b) e 7.7(a) e (b) ilustram os resultados da análise de temperaturas para os quatro casos de estudo ao longo do dia obtidos via abordagem numérica.

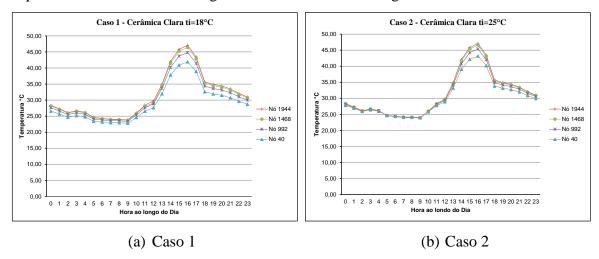


Figura 7.6 – Casos 1 e 2: Transiente térmico via método numérico na seção A-A' do sistema de revestimento cerâmico para cerâmica clara.

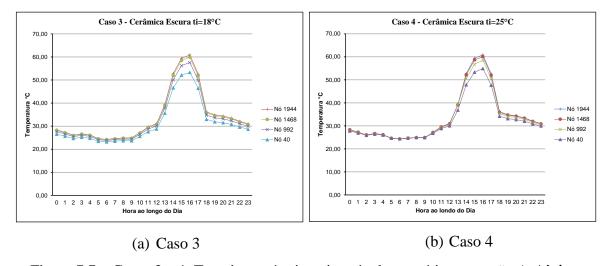


Figura 7.7 – Casos 3 e 4: Transiente térmico via método numérico na seção A-A' do sistema de revestimento cerâmico para cerâmica escura.

As Figuras 7.8(a) e (b) e 7.9(a) e (b) apresentam os resultados do transiente térmico na seção A-A' do sistema de revestimento cerâmico para os quatro casos de estudo ao longo do dia e obtidos via método analítico usando o *software* MAPLE, conforme descrito no Apêndice A.

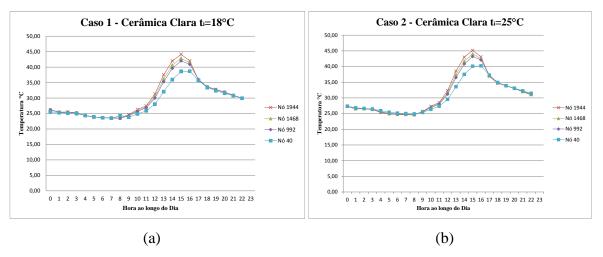


Figura 7.8 – Casos 1 e 2: Transiente térmico via método analítico na seção A-A' do sistema de revestimento cerâmico para cerâmica clara.

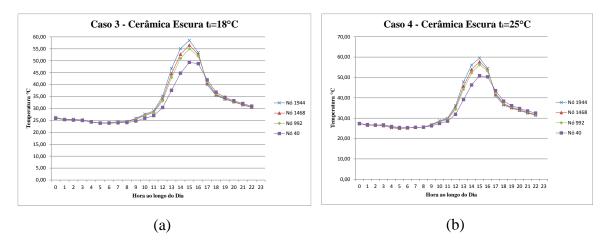


Figura 7.9 – Casos 3 e 4: Transiente térmico via método analítico na seção A-A' do sistema de revestimento cerâmico para cerâmica escura.

A Tabela 7.2 apresenta a temperatura máxima atingida nas superfícies externas (t_e) e a variação máxima da temperatura interna (Δt) às 17h para os quatro casos de estudo, obtidos via método analítico.

Tabela 7.2 - Variação da temperatura interna (Δt) às 17h via método analítico.

Casos	t _e	t _{S/R}	$\Delta \mathbf{t}$
Caso 1	42,05°C	22,51°C	19,54℃
Caso 2	43,08°C	27,14°C	15,94°C
Caso 3	53,44°C	23,91°C	29,53°C
Caso 4	54,47°C	28,53°C	25,94°C

As Figuras 7.10(a) e (b) e 7.11(a) e (b) apresentam um gráfico comparativo das variações de temperatura na seção A-A' do sistema de revestimento cerâmico para os quatro casos de estudo ao longo do dia, obtidas via métodos analítico e numérico.

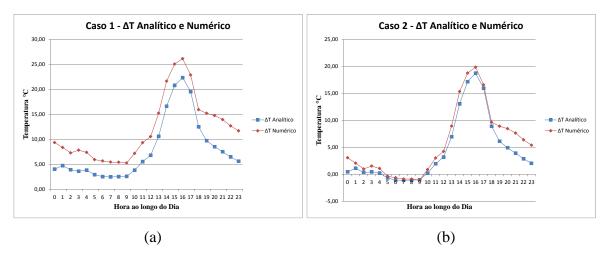


Figura 7.10 – Casos 1 e 2: Variação da temperatura ao longo do dia via métodos analítico e numérico na seção A-A'.

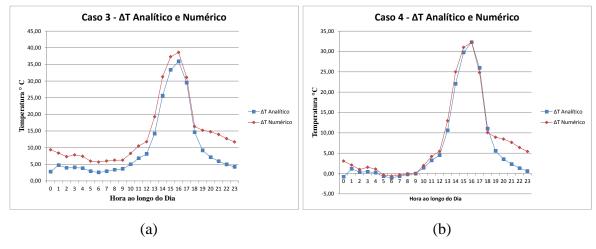


Figura 7.11 – Casos 3 e 4: Variação da temperatura ao longo do dia via métodos analítico e numérico na seção A-A'.

A Tabela 7.3 apresenta a variação máxima da temperatura interna (Δt), observada às 17h, para os quatro casos de estudo, obtida via métodos analítico e numérico.

Tabela 7.3 - Variação da temperatura interna (Δt) às 17h via métodos analítico e numérico.

Casos	∆t (analítico)	Δt (numérico)
Caso 1	19,54℃	22,88°C
Caso 2	15,94℃	16,59°C
Caso 3	29,53℃	31,11°C
Caso 3	25,94°C	24,81°C

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentamos algumas considerações e avaliações acerca dos resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados nessa pesquisa sobre o estudo da resistência à fadiga nas argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII e, ainda, sobre os resultados da análise de tensões e temperaturas obtidas da análise numérica do modelo em Elementos Finitos, que representa um sistema de revestimento cerâmico composto de três camadas (emboço, argamassa colante, cerâmica) e suas interfaces. A análise de tensões e transiente térmico foi realizada para os quatro casos de estudo representando uma estrutura de sistema de revestimento cerâmico de fachadas, considerando a combinação de cerâmica clara e escura e temperatura interna de 18°C e 25°C.

A análise de tensões permitiu identificar as tensões que solicitam a estrutura de revestimento cerâmico advindas das temperaturas externa e interna do ambiente e, consequentemente, o efeito de fadiga na argamassa colante e de emboço do sistema de revestimento cerâmico. E, a análise térmica permitiu avaliar a variação e distribuição de temperaturas no interior do sistema de revestimento cerâmico modelado.

8.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais ocorreram em dois momentos, primeiro houve a caracterização das propriedades das argamassas colantes no estado fresco e endurecida e, em seguida, realizaram-se os ensaios de resistência à fadiga na tração e na compressão axiais dessas mesmas argamassas colantes. Observou-se que, nos ensaios experimentais de resistência à fadiga, os corpos de prova utilizados atenderam às expectativas esperadas, ou seja, os resultados gerados nos ensaios permitiram obter as curvas S-N (curva de *Wöhler*). Além disso, foram utilizados carregamentos e frequência constantes e, com isso, não foi possível verificar a influência da frequência no comportamento da resistência à fadiga das argamassas colantes. Entretanto, isso não invalida os resultados obtidos, mesmo sabendo-se que o sistema de revestimento normalmente está sujeito à ação de cargas e frequências variáveis.

Os ensaios de fadiga são caracterizados por uma grande dispersão dos resultados devido às irregularidades da microestrutura das argamassas colantes. Em função disso, todas as normas

que tratam do assunto propõem realizar ensaios com carregamentos iguais e repetidos com corpos de prova semelhantes. Assim sendo, neste trabalho foram realizados vários ensaios, levando-se em conta a uniformidade dos corpos de prova e do carregamento aplicado, para obter a resistência à fadiga das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII. Durante os ensaios experimentais de resistência à fadiga realizados, verificou-se que os corpos de prova das argamassas colantes industrializadas ACII e ACIII ensaiados em um mesmo nível de carregamento (tensão) rompiam com um número de ciclos pouco variável. Esse fenômeno ocorreu devido ao controle rigoroso no processo de moldagem e cura dos corpos de prova.

8.1.1 Ensaio de fadiga à tração axial da argamassa colante industrializada ACII

O valor obtido no ensaio estático de resistência à tração na flexão da argamassa colante industrializada ACII foi de 3,77MPa. O corpo de prova sofreu danos, em um único ensaio, a partir da tensão de tração igual a 0,71MPa com um número de ciclos igual a 4.213 ciclos. Mas, com a tensão de tração igual a 0,61MPa, o corpo de prova não sofreu ruptura até o número de ciclos superior a 10^6 ciclos, quando a máquina MTS 810 foi desligada. Com isso, pode-se constatar que, para os ensaios realizados, a resistência à fadiga ou limite de fadiga (σ_f) na tração axial da argamassa colante industrializada ACII foi de 0,61MPa. Isso corresponde a 16,18% do valor da resistência à tração na flexão da argamassa colante ACII que foi de 3,77MPa.

8.1.2 Ensaio de fadiga à tração axial da argamassa colante industrializada ACIII

O valor obtido no ensaio estático de resistência à tração na flexão da argamassa colante industrializada ACIII foi de 3,26MPa. O corpo de prova sofreu danos, a partir da tensão de tração igual a 1,12MPa com um número de ciclos igual a 62.517 ciclos. Mas, com a tensão de tração igual a 1,02MPa, o corpo de prova não sofreu ruptura até o número de ciclos superior a 10^6 ciclos, quando a máquina MTS 810 foi desligada. Com isso, pode-se constatar que, para os ensaios realizados, a resistência à fadiga ou limite de fadiga (σ_f) na tração axial da argamassa colante ACIII foi de 1,02MPa. Isso corresponde a 31,28% do valor da resistência à tração na flexão da argamassa colante ACIII que foi de 3,26MPa.

8.1.3 Ensaio de fadiga à compressão axial da argamassa colante ACII

O valor obtido no ensaio estático de resistência à compressão axial da argamassa colante ACII foi de 10,91MPa. O corpo de prova sofreu danos a partir da tensão de compressão igual a 5,10MPa com um número de ciclos igual a 345.890 ciclos. Mas, com a tensão de compressão igual a 5,00MPa, o corpo de prova não sofreu ruptura até o número de ciclos superior a 10^6 ciclos, quando a máquina MTS 810 foi desligada. Com isso, pode-se constatar que, para os ensaios realizados, a resistência à fadiga ou limite de fadiga (σ_f) na compressão axial da argamassa colante ACII foi de 5,00MPa. Isso corresponde a 45,82% do valor da resistência à compressão axial da argamassa colante ACII que foi de 10,91MPa.

8.1.4 Ensaio de fadiga à compressão axial da argamassa colante ACIII

O valor obtido no ensaio estático de resistência à compressão axial da argamassa colante ACIII foi de 9,68MPa. O corpo de prova sofreu danos até a tensão de compressão igual a 8,46MPa com um número de ciclos igual a 298.632 ciclos. Mas, com a tensão de compressão igual a 7,75MPa, o corpo de prova não sofreu ruptura por fadiga até o número de ciclos superior a 10^6 ciclos, quando a máquina MTS 810 foi desligada. Com isso, podemos constatar que a resistência à fadiga ou limite de fadiga (σ_f) na compressão axial da argamassa colante ACIII é de 7,75MPa. Isso corresponde a 80,06% do valor da resistência à compressão axial da argamassa colante ACIII que foi de 9,68MPa.

8.2 ANÁLISE NUMÉRICA DAS TENSÕES

O modelo em elementos finitos utilizado para representar a estrutura de revestimento é um modelo conservador já utilizado nas pesquisas de Saraiva (1998), Uchôa (2007) e Barbosa (2013) e que considera algumas hipóteses simplificadoras como aderência absoluta entre a argamassa colante e o emboço, e a camada de substrato perfeitamente rígida e indeformável. Assim sendo, as tensões produzidas pelo modelo proposta tendem a ser mais elevadas do que seriam na realidade. O comportamento cíclico das tensões nas diversas camadas do modelo numérico que representa o sistema de revestimento cerâmico é influenciado pelo transiente térmico usado, pelas condições de contorno impostas e pelas

diferenças nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais entre as diversas camadas do sistema de revestimento cerâmico.

As tensões S_x observadas no sistema de revestimento cerâmico como resultado da análise numérica para os quatro casos de estudo (Tabela 6.1) às 17h, foram predominantemente de compressão. Ou seja, toda a estrutura do modelo sofreu um processo de dilatação, o qual foi contido pelas condições de contorno de deslocamento nulo nas extremidades da estrutura, comprimindo-a. Essa condição de contorno, que impede a dilatação da estrutura acrescida das restrições intrínsecas ao deslocamento entre as fibras do material, promovem o surgimento das tensões de compressão elevadas na camada da cerâmica conforme resultados obtidos de -7,16MPa no Caso 1 para a cerâmica clara e de -10,57MPa no Caso 3 para a cerâmica escura. Ou seja, a cerâmica escura (Caso 3) promove tensões normais S_x de compressão maiores que a cerâmica clara na estrutura do modelo numérico.

As tensões normais S_y às 17h foram predominantemente de tração nos nós 1706 e 1944 que representam a cerâmica e, para os demais nós do modelo numérico simplificado em MEF, a tensão S_y observada foi de compressão. As tensões de tração apresentadas na camada cerâmica do caso modelado representam uma tendência ao arqueamento das peças cerâmicas no sentido de tentar expulsar para fora as peças cerâmicas ao mesmo tempo que tenta abrir as fibras entre as camadas de emboço e argamassa colante embaixo das peças cerâmicas. Isso é causado pela compressão da estrutura no eixo "x" que projeta uma cerâmica contra a outra. Esse fenômeno reforça a importância de se ter flexibilidade do rejunte para minimizar esses efeitos no sistema de revestimento cerâmico. Para os quatro casos estudados observase que a menor tensão S_y foi de 0,50MPa no Caso 2 e a maior foi de 1,37MPa no Caso 3.

Como o rejunte possui um módulo de elasticidade muito menor que a cerâmica então ele é comprimido entre duas peças cerâmicas e se deforma mais que a cerâmica na direção vertical. Consequentemente, com essa deformação do rejunte, ele comprime as camadas de emboço e argamassa colante abaixo dele, gerando o aparecimento de tensões de compressão abaixo do rejunte, conforme mostrado na análise da deformada e concentrada de tensões de *Von Mises*.

As tensões S_x , S_y e S_{xy} geradas para os quatro casos estudados mostrou que, para o modelo numérico adotado e considerando às 7h e 17h do dia, a tonalidade da cerâmica (clara e

escura) é um fator importante que influencia nos resultados de tensões obtidas. Observou-se que as tensões S_x , S_y e S_{xy} são mais elevadas para o Caso 3, ou seja, cerâmica escura e temperatura interna adotado de 18°C do que nos casos onde a cerâmica é clara.

No modelo numérico com a cerâmica escura, as temperaturas maiores geram deformações e tensões maiores, provocando a ruptura por fadiga mais cedo, ou seja, o tempo de vida útil do sistema torna-se muito menor quando comparado com o uso da cerâmica clara e considerando as condições de contorno de confinamento adotadas. Isso ocorre porque a cerâmica escura absorve mais a temperatura incidente devido ao fato do seu coeficiente de absorção térmica, 0,95, ser maior que o da cerâmica clara que é de 0,45. Assim sendo, no modelo numérico com cerâmica clara, o efeito da temperatura cíclica no sistema é mais demorado em função da absorção menor da temperatura. Portanto, considera-se mais aconselhável a utilização da cerâmica clara para revestimento cerâmico externo, de forma a minimizar os efeitos da tensão e deformação.

Os resultados sobre o estudo de fadiga da argamassa colante considerando as tensões principais S₁ e S₂ (mínima e máxima) geradas nas regiões dos nós 992, 1230 e 1468 do modelo numérico que representam a camada da argamassa colante industrializada para os quatro casos de estudo mostraram que não há risco de ruptura por fadiga em nenhum caso por ação exclusiva do efeito da temperatura nas placas cerâmicas. Isso significa que as tensões geradas nesses nós não apresentaram uma variação de tensão superior ao valor de referência de resistência à fadiga que é de 4,83MPa à compressão. Portanto, nesses casos não há risco de ruptura por fadiga, segundo os resultados obtidos neste trabalho.

Conclui-se que a argamassa colante industrializada ACII não se rompe por fadiga devido as suas características física e mecânica descritas no Item 3.1.3.1, como a característica de adesividade que permite absorver os esforços existentes em revestimento de paredes externas decorrentes de ciclos de flutuação térmica. Além disso, a argamassa colante industrializada ACII tem o módulo de elasticidade baixo, no caso, 2,97GPa conforme Tabela 5.4, o que torna a argamassa colante deformável quando submetida a solicitações de tensões.

Ainda sobre o estudo de fadiga em sistemas de revestimento cerâmico, os resultados obtidos da análise numérica de fadiga da argamassa de emboço considerando as tensões principais S₁ e S₂ (mínima e máxima) geradas nos nós 40, 278, 516, 754 e 992 do modelo numérico

que representa a camada da argamassa de emboço para os quatro casos de estudo mostraram que há risco de ruptura por fadiga nos Caso 3 e Caso 4. Isso significa que as tensões principais S_1 e S_2 geradas nos nós da argamassa de emboço do modelo numérico apresentaram uma variação de tensão superior ao valor de referência de resistência à fadiga que é de 1,70MPa à compressão. Portanto, nesses casos, onde a cerâmica é escura há risco de ruptura por fadiga na argamassa de emboço, segundo os resultados obtidos neste trabalho para um número de ciclos de aproximadamente $10^{3,08}$ ciclos (3 anos e 3 meses) para o Caso 3 e de, aproximadamente, $10^{4,42}$ ciclos (75 anos) para o Caso 4.

8.3 ANÁLISE NUMÉRICA E ANALÍTICA DAS TEMPERATURAS

Pelos resultados obtidos no Capítulo 7, observa-se que a variação de temperatura no interior de uma parede equivalente modelada em Elementos Finitos, conforme definição apresentada nesta pesquisa, para representar um sistema de revestimento cerâmico foi de 16,59°C para o Caso 2 e de 31,11°C para o Caso 3. Esses valores representam, respectivamente, a menor e maior variação de temperatura no interior de um sistema de revestimento cerâmico às 17h para os quatro casos estudados, via método numérico. De forma similar, observa-se que, pela abordagem analítica, a variação de temperatura no interior de um sistema de revestimento cerâmico foi de 15,94°C para o Caso 2 e de 29,53°C para o Caso 3. Portanto, podemos inferir que a cerâmica clara e temperatura interna de 25°C (Caso 2) é o melhor caso e que a cerâmica escura e temperatura interna de 18°C (Caso 3) é o pior caso para promover deformações e fadiga na estrutura da parede de um sistema de revestimento cerâmico. Ou seja, quanto menor o índice de absorção térmica do material e a troca de calor por condução, determinado pela temperatura interna, melhor para a estrutura da parede. No caso, a cerâmica clara e a temperatura interna de 25°C representam o melhor cenário onde se tem o menor transiente térmico na estrutura da parede modelada em MEF.

Além disso, verifica-se que a cerâmica escura, que tem um coeficiente de absorção térmica maior do que o da cerâmica clara, absorve mais a temperatura externa do ambiente aplicada do que a cerâmica clara. Assim sendo, no modelo numérico utilizando a cerâmica escura, o efeito do transiente térmico aplicado gerou deformações e tensões maiores, o que levaria a ruptura mais cedo do sistema de revestimento cerâmico. Enquanto isso, no modelo numérico utilizando a cerâmica clara, o efeito do transiente térmico no sistema de revestimento é mais tardio prolongando a vida útil do sistema de revestimento cerâmico. Isso se deve à menor

absorção da temperatura externa pelo sistema de revestimento cerâmico em função do coeficiente de absorção térmica ser menor (0,45) na cerâmica clara quando comparado ao valor do coeficiente de absorção térmica da cerâmica escura (0,95).

8.4 TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa sugere como trabalhos futuros, os seguintes tópicos:

- Aprofundar os ensaios de fadiga à tração e à compressão para validar a semelhança do comportamento de materiais frágeis, como o concreto com relação às argamassas adotadas no modelo numérico de sistemas de revestimento cerâmico de fachada;
- Estudar e desenvolver melhorias na abordagem numérica em elementos finitos de um sistema de revestimento cerâmico de fachada, tais como, tornar a condição de contorno menos conservadora; não considerar o substrato totalmente rígido; e, ainda, não considerar uma perfeita aderência entre as interfaces dos materiais do sistema de revestimento cerâmico;
- Desenvolver e executar uma metodologia de ensaio experimental usando placas de revestimento cerâmico e simulando a incidência de um transiente térmico com o objetivo de medir e extrair as temperaturas e as tensões nas interfaces das camadas de um sistema revestimento cerâmico de fachada. Assim sendo, os resultados obtidos poderão ser comparados com os resultados do modelo numérico buscando um melhor entendimento da influência da temperatura no efeito de fadiga da estrutura do revestimento cerâmico;
- Investigar o comportamento à fadiga de argamassas com diferentes módulos de elasticidade no sistema de revestimento cerâmico;
- Investigar o comportamento à fadiga de argamassas com diferentes umidades no sistema de revestimento cerâmico;
- Investigar o comportamento e avaliar a resistência de aderência por fadiga através do transiente térmico no sistema de revestimento cerâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, M. (2001). "Modelação do Comportamento de Revestimentos Cerâmicos". Tese de Mestrado. Lisboa: LNEC e IST.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
NBR 5738, Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Ric
de Janeiro, 2004.
NBR 6118, Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014
NBR 13276, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos -
Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.
NBR 13277, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos —
Determinação de retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.
NBR 13278, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos —
Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
NBR 13279, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos -
Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
NBR 13280, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos —
Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005
NBR 13281, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos —
Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.
NBR 13529, Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas —
Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
NBR 13753, Revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com
utilização de argamassa colante - Procedimento. Rio de Janeiro, 1997.
NBR 13754, Revestimento de paredes internas com placas cerâmicas e com
utilização de argamassa colante - Procedimento. Rio de Janeiro, 1997.
NBR 13755, Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e
com utilização de argamassa colante - Procedimento. Rio de Janeiro, 1997.
NBR 13817, Placas cerâmicas para revestimento - Classificação. Rio de Janeiro
1997.
NBR 13818, Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de
ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

- _____ NBR 14081, Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Rio de Janeiro, 2012.
 _____ NBR 14084, Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.
 _____ NBR 14085, Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas Determinação do deslizamento. Rio de Janeiro, 2005.
 ____ NBR 14992, A.R. Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2003.
- ANDERSON, T. L. (1995). "Frature Mechanics". CRC.
- ANSYS (1994). "Analysis System" volumes 1 a 5. Houston, PA USA.
- ANFACER. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. www.anfacer.org.br.
- ASTM, C 780-96. Standard test method for preconstruction and construction evaluation of mortars for plain and reinforced unit masonry, 1996.
- ASTM, E 468-11. Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials.
- ASTM, E 1823-96. Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture testing, 1996.
- ÁVILA, G. G. (2005). "Cálculo de Fadiga de Risers Rígidos através da Mecânica da Fratura", Dissertação de Mestrado, UFRJ, 237p.
- BABU, R. R. et al. (2005). "Constitutive Modeling of Concrete: An overview". Asian J. of Civil Eng. (Building and Housing), v. 6, n° 4.
- BALBO, J. T. e SEVERI, A. A. (2002). "Thermal gradientes in concrete pavements in tropical environment: na experimental appraisal". Journal of the Transportation Research Board, TRB 1809, v 1809, p. 12-22, Washington, D. C.

- BANNANTINE, J. A. et al. (1990). "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis", Ed. Prentice Hall, New Jersey, USA.
- BARBOSA, A. DA S. (2013). "Estudo Numérico-Computacional e Analítico do Choque Térmico em Fachadas de Edificações", Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
- BOWMAN, R. e WESTGATE, P. (1992). "Natural Moisture Behaviour of Typical Australian Ceramic Tiles. Ceramic, Adding the Value: AUSTCERAM 92". Editora M. J. Bannister, CSIRO Publications.
- BOWMAN, R. G. e BANKS, P. J. (1995). "Theoretical Modeling of External Wall Tiling Systems".
- BRITO, J.; COLEN, I. F. e SILVESTRE, J. D. (2003). "Estratégia de Manutenção Próactiva para Juntas de Revestimentos Cerâmicos Aderentes (RCA)". 3° ENCORE no LNCE, Portugal.
- BROEK, D. (1988). "The Practical Use of Fracture Mechanics". Kluwer Academic Publishers, Ohio, USA.
- BSI (1980). BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 5980. "Specification for Adhesives for use with ceramic tiles and mosaics". London.
- CAMPANTE, E. F. e BAÍA, L. L. M. (2003). "Projeto e Execução de revestimento Cerâmico". CTE, Primeiros Passos da qualidade no Canteiro de Obra, O Nome da Rosa, São Paulo, SP.
- CARASEK, H. (2007). "Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais". São Paulo, IBRACON.
- CERVO, T. C. (2004). "Estudo da Resistência à Fadiga de Concreto de Cimento Portaland para Pavimentação", Tese de Doutorado, EP-USP, Brasil.

- CHAGAS, S. V. M. (2009). "Estudo e proposta de um modelo de resistência à fadiga de argamassa de revestimento em estado plano e tridimensional de tensões", Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- CHEW, M. Y. L. (1992). "The Study of Adhesion Failure of Wall Tiles. Building and Environment", v 27, n° 4, pp 493-499.
- CICHINELLI, G.; BORGES, C. e MEDEIROS, J. S. (2006). "Patologia cerâmicas". Revista Téchne, ed. 116.
- CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C. e CARASEK, H. (1995). "Argamassas de Revestimento: Características, Propriedades e Métodos de Ensaio", Boletim 68 IPT, São Paulo.
- COLINS, J. A. (1993). "Failure of Materials in Mechanical Design". New York: John Willey & Sons.
- COSTA E SILVA, A. J. (2004). "*Revestimento*". Apostila. Universidade Católica de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil, Recife.
- COSTA E SILVA, A. J. (2014). Notas de Aula MBA TGCE Poli. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife.
- CRESCENCIO, R. e BARROS, M. (2003). "A influência do choque térmico na resistência à tração do revestimento decorativo monocamada". Anais do Simpósio Brasileiro de Tecnologias das Argamassas. São Paulo, SP.
- CSTB Revêtements de murs en carreaux céramiques ou analogues collés au moyen de mortiers-colles ou d'adhésifs Cahier 3264, 3265, 3266, 3267 et 3351 Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, França, 1999/2000.

- DA SILVA, D. A.; ROMAN, L. M. F. e ROMAN, H. R. (1998). "*Tensões Térmicas em Revestimento Cerâmico*". Núcleo de Pesquisa em Construção (NPC) Universidade Federal de Santa Catarina, SC.
- FARLOW, S. J. (1982). "Partial Differential Equations for Scientists and Engineers". Dover Publications Inc.. New York, United States.
- FILHO, F. M. F. (2002). "Propagação de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas Circunferenciais de Aço API 5l Grau X-65 para Utilização em Risers Rígidos", Tese de Doutorado, UFRJ, 173p.
- FIORITO, A. J. S. I. (1994). "Manual de Argamassa e Revestimento Estudo e Procedimento de Execução". Editora Pini. São Paulo, SP.
- FROTA, A. B. e SCHIFFER, S. R. (2003). "*Manual de Conforto Térmico*". Studio Nobel, Sexta Edição. São Paulo, SP.
- GARCIA, A.; SPIM, J. A. e DOS SANTOS, C. A. (2000). "Ensaio dos Materiais". 1ª ed. Rio de Janeiro. Editora LTC.
- GASTALDINI, A. L. G. e SICHIERI, E. P. (2010). "Materiais Cerâmicos para Acabamentos e Aparelhos". In: Geraldo C. Isaia. (Org.). Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. 2ª ed. São Paulo: Geraldo C. Isaia IBRACON, v 1, pp 587-616.
- GRIFFITH, A. A. (1920). "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids". In Pholosophical transactions of the Royal Society. London, A221, pp 162-198.
- HABERMAN, R. (1987). "Elementary Applied Partial Differential Equations". Prentice Hall Inc.. New Jersey, United States.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS IPT. (1981). Relatório 16.277. Volume IV. "Avaliação de Desempenho de Habitações Térreas Unifamiliares Conforto Higrotérmicos". São Paulo, SP.

- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA INMET. www.inmet.gov.br.
- ISO 13006: "Normas Mundiais de Pisos e Azulejos, Revestimentos Cerâmicos: Especificações e Usos". CCB Informação ao público.
- JUNGINGER, M. (2003). "Rejuntamento de Revestimento Cerâmico: Influência das Juntas de Assentamento na Estabilidade de painéis", Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 141p.
- KUPFER, H. et al. (1969). "Behaviour of Concrete Under Biaxial Stresses", Proc. Amer. Concrete Inst. 66(8), pp 656-666.
- LEE, M. K. e BARR, B. I. G. (2004). "An Overview of the Fatigue Behaviour of Plain and Fiber Reinforced Concrete". Cement & Concrete Composites Journal.
- LEMOS, C. A. D. (2005). "Análise de fadiga em risers Flexíveis", Tese de Doutorado, UFRJ, 265p.
- LU, T. J. e FLECK, N. A. (1998). "The thermal shock resistance of solids". Acta Materialia, v 46, n° 13, pp 4755-4768.
- MAGGI, P. L. O. (2004). "Comportamento de pavimentos de concreto estruturalmente armados sob carregamentos estáticos e dinâmicos", Tese de Doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- MAGNABOSCO, R. (2000). "Técnicas de Ensaio para Previsão da Vida em Fadiga de Liga de Alumínio AA7175", LabMat FEI Faculdade de Engenharia Industrial.
- MEDEIROS, J. S. (1999). "Tecnologia e projeto de revestimento cerâmico de fachada", Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

- MEDEIROS, J. S. e SABBATINI, F. H. (1999). "Tecnologia e Projeto de Revestimentos Cerâmicos de Fachadas de Edifícios". Boletim Técnico Escola Politécnica USP, São Paulo, pp 9-15.
- MEGGIOLARO, M. A. e CASTRO, J. T. P. (2003). "Fatigue life prediction of oil ducts under servisse loads". Rio Pipeline, Conference & Exposition, IBP388_03.
- MOÑOZ MOSCOVO, Y. F. (2013). "Estudo Numérico e Experimental das Tensões na Argamassa Colante de Fachada de edificação Sob Ação da Fadiga Termo-Mecânica", Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
- PAES, I. N. L. e CARASEK, H. (2002). "Desempenho das argamassas de rejuntamento no sistema de revestimento cerâmico". Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v 2, nº 2, pp 93-103.
- PALMGREN, A. (1924). "Die Lebensdauer von kugellaben VDI". Z.Ver. Deustsch. Ingen., n° 68, pp 339-341.
- PARIS, P. C. e ERDOGAN, F. (1960). "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws". Journal of Basic Engineering, v 85, pp 528-534.
- PASTOUKHOV, V. A. e VOORWALD, H. J. C. (1995). "Introdução à mecânica da integridade estrutural". Editora Unesp, São Paulo, SP.
- 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 do Programa de Pós-Graduação em Estrutura e Construção Civil, Universidade de Brasília, 195p.
- PÓVOAS, Y. V. e JOHN, V. M. (1999). "Tempo em Aberto da Argamassa Colante: Influência dos Aditivos HEC e PVAc". Boletim Técnico Escola Politécnica USP. São Paulo.
- PÓVOAS, Y. V.; JOHN, V. M. e CINCOTTO, M. A. (2001). "Influência da perda de água por evaporação na resistência de aderência entre argamassa colante e placa cerâmica". In:

SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 40., Brasília, 23 a 25 de maio de 2001. Anais. Brasília.

- PÓVOAS, Y. V; JOHN, V. M. e CINCOTTO, M. A. (2002). "Influência da Perda de Água por Evaporação na Resistência de Aderência entre Argamassa Colante e Placa Cerâmica". In: Ambiente Construído, 2°, Porto Alegre, RS, pp 7-18.
- RIBEIRO, F. H. (2006). "Especificação de juntas de movimentação em revestimento cerâmico de fachadas de edifícios: Levantamento do Estado da Arte", Dissertação de Mestrado, Escola Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 158p, São Carlos.
- RIVERO, R. (1985). "Acondicionamento Térmico Natural Arquitetura e Clima", Editora da Universidade, Rio Grande do Sul.
- ROSA, J. A. da (2001). "Determinação dos Campos de Velocidade e Temperatura em Ambientes Ventilados", Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- SARAIVA, A. G. (1998). "Contribuição ao Estudo de Tensões de Natureza Térmica em Sistema de Revestimento Cerâmico de Fachada", Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- SARAIVA, A. G.; BAUER, E. e BEZERRA, L. M. (2001). "Desempenho Estrutural de Argamassas Colantes como Subsídio para a Solução de Problemas Patológicos". Volume II dos Anais do IV Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade, Porto Alegre, RS, pp 427-432.
- SHIGLEY, J. e MISCHKE, C. (2004). "Mechanical Engineering Design", New York: McGraw Hill.
- SILVA, C. O. (2003). "Análise crítica dos requisitos e critérios de qualidade da argamassa colante", Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 222p.

- SILVA, C. O. e CINCOTTO, M. A. (2004). "Análise crítica dos requisitos, critérios e ensaios para argamassa colante". Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil E-mat, v 1, nº 2, pp 128-147.
- SILVA, M. N. B. (2000). "Avaliação Numérica com o Método dos Elementos Finitos das Tensões Termo-Mecânica em Sistema de Revestimento de Fachadas", Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- SILVA, M. N. B.; SARAIVA, A. G.; BEZERRA, L. M. e BAUER, E. (2000). "Estudo por Elementos Finitos das Tensões Térmicas em Revestimento Cerâmico de Fachadas", CD-Room XXIX Jornadas Sulamericanas de Ingenieria Estructural Jubileo Prof. Julio Ricaldoni. Punta del Este, Uruguai, pp 1-19.
- TAM, C.; LOO, Y.; QUEK, S. e SAW, W. (1993). "Simulated Thermal Fatigue Testing of Wall-To-Tile Bond. Durability of Building Materials and Components". Edited by S. Nagataki. T. Nireki and F. Tomosawa. E & FN Spon.
- TEMOCHE ESQUIVEL, J. F.; RIBEIRO, F. A.; BARROS, M. M. S. B. e SABBATINI, F. H. (2005). "Avaliação da influência das condições de execução do emboço na resistência de aderência do revestimento cerâmico". In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas I International Symposium on Mortars Technology, Florianópolis, SC.
- TEPFERS, R. e KUTTI, T. (1979). "Fatigue Strength of Plain, Ordinary and Lightweight Concrete". ACI Journal, v 76, n° 29, pp 635-652.
- TEPFERS, R. (1982). "Fatigue of Plain Concrete Subjected to Stress Reversals". ACI Journal, Special Publication, v 75, n° 9, pp 195-215.
- TIMOSHENKO, P. S. (1961). "Theory of Elastic Stability". MacGraw-Hill Book Company Inc. New York, USA.
- THOMAZ, E. (1989). "Trincas em Edifícios causas, prevenção e recuperação." Coedição IPT/EPUSP/PINI. São Paulo, SP.

- UCHÔA, J. C. B. (2007). "Procedimento Numérico e Experimental para a Avaliação da Resistência à Fadiga de Sistema de Revestimento", Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Estrutura e Construção Civil, Universidade de Brasília, 159p.
- UCHÔA, J. C. B.; BEZERRA, L. M.; BAUER, E.; DAS CHAGAS, S. V. M. e ARAÚJO, J. (2008). "Análise Experimental da Resistencia à Fadiga de Sistema de Revestimento". In: Anais do 50° Congresso Brasileiro do Concreto. Salvador: IBRACON.
- UNION EUROPÉENNE POUR L'AGRÉMENT TECHNIQUE DANS LA CONSTRUCTION UEAtc (1979). "Directrices UEAtc para la evaluacion técnica de colas para revestimentos cerâmicos". Madri, ICCET, n349.
- -YOSHIKAWA, K. e LITVAN, G. G. (1994). "Thermal Stress in Mortar-Tile Systems". RILEM- Materiaux et Constructions, v 17, n° 101, pp 351-357.
- VEIGA, M. R. (2003). "Comportamento da argamassa de revestimento de paredes". In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, 5°, São Paulo. Anais. São Paulo: USP, pp 63-93.
- VIEIRA, A. C. (1998). "Destacamento de Placas Cerâmicas: estudo de Algumas Variáveis", Dissertação de Mestrado, Universidade Mackenzie, São Paulo, SP.
- ZANOTTO, E. D. e MIGLIORE Jr. A. R. (1991). "Propriedade mecânica dos materiais cerâmicos: uma introdução". Revista Cerâmica, v 37, nº 247, pp 07-16.
- WILLAM, K. J. e WARNKER, E. P. (1974). "Constitutive Model for Triaxial Behaviour of Concrete, Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses". International Association for Bridges and Structural engineering, Bergamo, Italy.

APÊNDICE A

CÁLCULO DO TRANSIENTE DE TEMPERATURA NA FACHADA

Para a análise do gradiente de temperatura foram considerados os dados de temperatura da cidade de Brasília - DF, localizada na latitude $\theta = 15^{\circ}47^{\circ}S$. Foi utilizada a maior temperatura já registrada na cidade de Brasília, que ocorreu no dia 28/10/2008, segundo fonte do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), cujo transiente ao longo do dia está apresentado na Tabela 4.1.

Para o cálculo da temperatura externa foram utilizados os dados de radiação solar incidente (Ig) correspondentes à latitude $\theta = 17^{\circ}S$, que se aproxima da latitude da cidade de Brasília. Foi escolhida a situação mais crítica que foi no sentido oeste (W) às 16 horas UTC, conforme descrito em Frota e Schiffer (2003) e apresentado na Tabela A.1.

Tabela A.1 – Valores de radiação solar incidente (*Ig*).

Hora	Ig (W/m²)	Hora	Ig (W/m²)
0:00	0	12:00	68
1:00	0	13:00	224
2:00	0	14:00	536
3:00	0	15:00	680
4:00	0	16:00	692
5:00	0	17:00	457
6:00	0	18:00	23
7:00	30	19:00	0
8:00	45	20:00	0
9:00	53	21:00	0
10:00	60	22:00	0
11:00	65	23:00	0

Considerando duas tonalidades de cerâmica, a clara e a escura, os valores do coeficiente de absorção térmica (α), utilizados na equação para o cálculo da temperatura externa, foram sugeridos por Thomaz (1989), e estão na Tabela A.2.

Tabela A.2 - Coeficiente de absorção térmica.

Tipo de Superfície	α
Cerâmica Clara	0,45
Cerâmica Escura	0,95

O cálculo da temperatura superficial externa (t_{ext}) do revestimento para a cerâmica clara e cerâmica escura são respectivamente.

$$t_{ext_{Clara}} = T_e + \frac{0.45.Ig}{25} \tag{A.1}$$

$$t_{ext_{Escura}} = T_e + \frac{0.95 \cdot Ig}{25} \tag{A.2}$$

As Equações A.3 e A.4 apresentam o valor da temperatura superficial externa (t_{ext}) para as cerâmicas clara e escura, considerando a maior temperatura do dia (T_e) de 34,60°C, referente ao horário das 16 horas UTC. A Tabela A.3 apresenta o valor da temperatura superficial externa (t_{ext}) , para a cerâmica clara e escura, em todas as horas do dia.

$$t_{ext_{Clara}} = 34,60 + \frac{0,45.692}{25} = 47,06^{\circ} C$$
 (A.3)

$$t_{ext}_{Escura} = 34,60 + \frac{0.95.692}{25} = 60,90^{\circ}C$$
 (A.4)

Tabela A.3 – Temperatura superficial externa do sistema de revestimento para cerâmica clara e escura.

Hora (UTC)	T _e (°C)	Ig (W/m²)	textClara (°C)	textEscura (°C)
0:00	27,30	0	27,30	27,30
1:00	26,10	0	26,10	26,10
2:00	25,60	0	25,60	25,60
3:00	26,20	0	26,20	26,20
4:00	24,50	0	24,50	24,50
5:00	24,30	0	24,30	24,30
6:00	23,50	0	23,50	23,50
7:00	23,10	30	23,64	24,24
8:00	22,90	45	23,71	24,61
9:00	22,40	53	23,35	24,41
10:00	24,90	60	25,98	27,18
11:00	27,20	65	28,37	29,67
12:00	28,40	68	29,92	31,28
13:00	30,80	224	34,83	39,31
14:00	32,40	536	42,05	52,77
15:00	33,60	680	45,84	59,44
16:00	34,60	692	47,06	60,90
17:00	34,90	457	43,43	52,57
18:00	34,80	23	35,21	35,67
19:00	34,20	0	34,20	34,20
20:00	33,50	0	33,50	33,50
21:00	32,10	0	32,10	32,10
22:00	30,90	0	30,90	30,90
23:00	29,80	0	29,80	29,80

Para o cálculo das temperaturas internas, os valores do coeficiente de condutibilidade térmica (*K*) foram extraídos do relatório nº 16277 do IPT (1981), de acordo com as massas específicas de cada material que compõe o sistema de revestimento cerâmico, como mostrado na Tabela A.4.

Tabela A.4 – Coeficiente de condutibilidade térmica.

Material	K (Kcal/m.°C.h)
Emboço	1,204
Argamassa colante	0,722
Cerâmica	1,720
Bloco	1,000

O modelo numérico adotado encontra-se na Figura 4.19. Com aquela geometria pode-se calcular o valor da resistência térmica (*Rt*) como sendo:

$$Rt = \frac{0,0065}{1,720} + \frac{0,0050}{0,722} + \frac{0,020}{1,204} + \frac{0,12}{1,00} + \frac{0,020}{1,204}$$

$$Rt = 0.00378 + 0.00693 + 0.01661 + 0.12 + 0.01661 = 0.16393 Kcal/h$$

Considerando a temperatura interna da edificação (T_{int}) de 25°C e as temperaturas externas (t_{ext}) calculadas, anteriormente, para a cerâmica clara e escura, serão calculadas, as temperaturas das interfaces $t_{C/AC}$, $t_{AC/E}$, $t_{E/S}$, $t_{S/R}$ e t_{int} do modelo de sistema de revestimento cerâmico, como mostrado na Figura A.1.

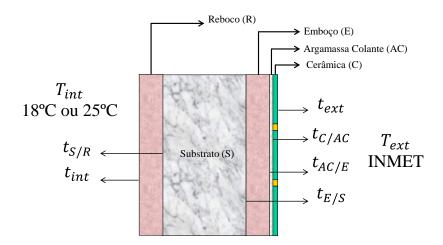


Figura A.1– Leitura das temperaturas nas interfaces do revestimento.

A seguir, é apresentado o processo de cálculo das temperaturas nas interfaces para a cerâmica clara e escura, considerando a maior temperatura do dia (T_{ext}) de 34,60°C, referente ao horário das 16 horas. As Tabelas A.5 e A.6 apresentam os valores de temperatura nas interfaces do sistema de revestimento cerâmico para as cerâmicas clara e escura com T_{int} de 25°C ao longo do dia.

O cálculo das temperaturas nas interfaces do sistema de revestimento cerâmico para a cerâmica clara e temperatura interna T_i de 25°C, é obtido pela Equação A.5:

$$Q = \frac{\Delta t}{Rt} \tag{A.5}$$

Sendo:

$$\Delta t = text_{Clara} - Ti = 47,06 - 25,00 = 22,06$$
°C

$$Q = \frac{22,06}{0.16393} = 134,57 Kcal/h$$

Para o cálculo das temperaturas nas interfaces $t_{C/AC}$, $t_{AC/E}$, $t_{E/S}$, $t_{S/R}$ e t_{int} , utiliza-se a Equação A.6.

$$\Delta t = Q.Rt \tag{A.6}$$

Cálculo da temperatura na interface cerâmica/argamassa colante ($t_{C/AC}$):

$$text_{Clara} - t_{C/AC} = Q.Rt_{e,2}$$
 (A.7)
 $47,06 - t_{C/AC} = 134,57.0,00378$
 $t_{C/AC} = 46,55^{\circ}C$

Cálculo da temperatura na interface argamassa colante/emboço ($t_{{\scriptscriptstyle AC/E}}$):

$$t_{C/AC} - t_{AC/E} = Q.Rt_{2,3}$$
 (A.8)
 $46,55 - t_{AC/E} = 134,57.0,00693$
 $t_{AC/E} = 45,62^{\circ}C$

Cálculo da temperatura na interface emboço/substrato ($t_{E/S}$):

$$t_{AC/E} - t_{E/S} = Q.Rt_{3,4}$$
 (A.9)
 $45,62 - t_{E/S} = 134,57.0,01661$
 $t_{E/S} = 43,38$ °C

Cálculo da temperatura na interface substrato/reboco interno ($t_{S/R}$):

$$t_{E/S} - t_{S/R} = Q.Rt_{4,5}$$
 (A.10)
 $43,38 - t_{S/R} = 134,57.0,12$
 $t_{S/R} = 27,24^{\circ}C$

Cálculo da temperatura interna da edificação (t_{int}):

$$t_{S/R} - t_{\text{int}} = Q.Rt_{5,i}$$
 (A.11)
 $27,24 - t_{\text{int}} = 134,57.0,01661$
 $t_{\text{int}} = 25,00^{\circ}C$

Tabela A.5 – Transiente-2: Temperaturas nas interfaces para cerâmica clara e $T_i = 25$ °C.

CERÁ	ÀMICA C	LARA E	TEMPER	RATURA	INTERN	A 25°C
Hora	text	Tc/ac	T _{AC/E}	TE/S	T _{S/R}	Tint
0	28,40	28,32	28,14	27,80	25,34	25,00
1	27,30	27,25	27,12	26,89	25,23	25,00
2	26,10	26,07	26,02	25,91	25,11	25,00
3	26,70	26,66	26,57	26,40	25,17	25,00
4	26,20	26,17	26,11	25,99	25,12	25,00
5	24,60	24,61	24,63	24,67	24,96	25,00
6	24,30	24,32	24,35	24,42	24,93	25,00
7	24,04	24,06	24,11	24,21	24,90	25,00
8	24,01	24,03	24,09	24,18	24,90	25,00
9	23,85	23,88	23,94	24,05	24,88	25,00
10	25,98	25,96	25,90	25,81	25,10	25,00
11	28,37	28,29	28,11	27,77	25,34	25,00
12	29,72	29,61	29,36	28,89	25,47	25,00
13	34,93	34,70	34,17	33,17	25,99	25,00
14	42,05	41,66	40,74	39,04	26,71	25,00
15	45,84	45,37	44,24	42,16	27,09	25,00
16	47,06	46,55	45,62	43,38	27,24	25,00
17	43,43	43,01	42,02	40,17	26,84	25,00
18	35,71	35,47	34,89	33,82	26,07	25,00
19	34,90	34,67	34,14	33,15	25,99	25,00
20	34,40	34,19	33,68	32,74	25,94	25,00
21	33,50	33,31	32,85	32,00	25,85	25,00
22	32,10	31,94	31,56	30,85	25,71	25,00
23	31,00	30,86	30,54	29,94	25,60	25,00

As temperaturas nas interfaces do sistema de revestimento cerâmico para a cerâmica escura com temperatura interna T_i de 25°C são obtidas a partir da Equação A.5, onde:

$$\Delta t = text_{Escura} - Ti = 60,90 - 25,00 = 35,90$$
°C

Substituindo os valores na Equação A.5, temos:

$$Q = \frac{35,90}{0.16393} = 219Kcal/h$$

Para o cálculo das temperaturas nas interfaces $t_{C/AC}$, $t_{AC/E}$, $t_{E/S}$, $t_{S/R}$ e t_{int} , utiliza-se a Equação A.6.

Cálculo da temperatura na interface cerâmica/argamassa colante ($t_{C/AC}$):

$$text_{Escura} - t_{C/AC} = Q.Rt_{e,2}$$
 (A.12)
 $60,90 - t_{C/AC} = 219.0,00378$
 $t_{C/AC} = 60,07^{\circ}C$

Cálculo da temperatura na interface argamassa colante/emboço ($t_{AC/E}$):

$$t_{C/AC} - t_{AC/E} = Q.Rt_{2,3}$$
 (A.13)
 $60,07 - t_{AC/E} = 219.0,00693$
 $t_{AC/E} = 58,55^{\circ}C$

Cálculo da temperatura na interface emboço/substrato ($t_{E/S}$):

$$t_{AC/E} - t_{E/S} = Q.Rt_{3,4}$$
 (A.14)
 $58,55 - t_{E/S} = 219.0,01661$
 $t_{E/S} = 54,92°C$

Cálculo da temperatura na interface substrato/reboco interno ($t_{S/R}$):

$$t_{E/S} - t_{S/R} = Q.Rt_{4,5} \tag{A.15}$$

$$54,92 - t_{S/R} = 219.0,12$$

 $t_{S/R} = 28,64$ °C

Cálculo da temperatura interna da edificação ($t_{\rm int}$):

$$t_{S/R} - t_{\text{int}} = Q.Rt_{5,i}$$
 (A.16)
 $28,64 - t_{\text{int}} = 219.0,01661$
 $t_{\text{int}} = 25,00^{\circ}C$

Tabela A.6 — Transiente-4: Temperaturas nas interfaces para cerâmica escura e $T_i = 25 \, ^{\circ}C$.

CERÂ	MICA ES	SCURA E	TEMPE	RATURA	INTERN	IA 25°C
Hora	t _{ext}	T _{C/AC}	T _{AC/E}	T _{E/S}	T _{S/R}	Tint
0	28,40	28,32	28,14	27,80	25,34	25,00
1	27,30	27,25	27,12	26,89	25,23	25,00
2	26,10	26,07	26,02	25,91	25,11	25,00
3	26,70	26,66	26,57	26,40	25,17	25,00
4	26,20	26,17	26,11	25,99	25,12	25,00
5	24,60	24,61	24,63	24,67	24,96	25,00
6	24,30	24,32	24,35	24,42	24,93	25,00
7	24,64	24,65	24,67	24,70	24,96	25,00
8	24,91	24,91	24,92	24,93	24,99	25,00
9	24,91	24,91	24,92	24,93	24,99	25,00
10	27,18	27,13	27,01	26,79	25,22	25,00
11	29,67	29,56	29,31	28,84	25,47	25,00
12	31,08	30,94	30,61	30,01	25,61	25,00
13	39,41	39,08	39,31	36,86	26,44	25,00
14	52,77	52,14	50,64	47,86	27,78	25,00
15	59,44	58,66	56,80	53,35	28,45	25,00
16	60,90	60,07	58,55	54,92	28,64	25,00
17	52,57	51,94	50,46	47,70	27,76	25,00
18	36,17	35,92	35,31	34,20	26,12	25,00
19	34,90	34,67	34,14	33,15	25,99	25,00
20	34,40	34,19	33,68	32,74	25,94	25,00
21	33,50	33,31	32,85	32,00	25,85	25,00
22	32,10	31,94	31,56	30,85	25,71	25,00
23	31,00	30,86	30,54	29,94	25,60	25,00

Para a temperatura interna de 18°C, os valores das temperaturas nas interfaces para a cerâmica clara e escura, são apresentados nas Tabelas A.7 e A.8, respectivamente. Os valores foram obtidos usando-se o mesmo procedimento descrito acima para a temperatura interna de 25°C.

Tabela A. 7 – Transiente-1: Temperaturas nas interfaces para cerâmica clara e $T_i = 18 \, ^{\circ}C$.

CERÁ	ÂMICA C	LARA E	TEMPER	RATURA	INTERN	A 18°C
Hora	t _{ext}	T _{C/AC}	T _{AC/E}	T _{E/S}	T _{S/R}	Tint
0	28,40	28,16	27,60	26,56	19,04	18,00
1	27,30	27,09	26,59	25,66	18,93	18,00
2	26,10	25,92	25,48	24,67	18,81	18,00
3	26,70	26,50	26,03	25,16	18,87	18,00
4	26,20	26,01	25,57	24,75	18,82	18,00
5	24,60	24,45	24,09	23,43	18,66	18,00
6	24,30	24,16	23,82	23,19	18,63	18,00
7	24,04	23,90	23,58	22,97	18,60	18,00
8	24,01	23,87	23,55	22,95	18,60	18,00
9	23,85	23,72	23,40	22,82	18,59	18,00
10	25,98	25,80	25,37	24,57	18,80	18,00
11	28,37	28,13	27,58	26,54	19,04	18,00
12	29,72	29,00	28,82	27,65	19,17	18,00
13	34,93	34,54	33,63	31,94	19,69	18,00
14	42,05	41,50	40,21	37,80	20,41	18,00
15	45,84	45,21	43,71	40,92	20,79	18,00
16	47,06	46,40	44,83	41,92	20,91	18,00
17	43,43	42,85	41,48	38,94	20,55	18,00
18	35,71	35,31	34,35	32,58	19,77	18,00
19	34,90	34,52	33,60	31,91	19,69	18,00
20	34,40	34,03	33,14	31,50	19,64	18,00
21	33,50	33,15	32,31	30,76	19,55	18,00
22	32,10	31,78	31,02	29,61	19,41	18,00
23	31,00	30,70	30,00	28,70	19,30	18,00

Tabela A.8 – Transiente-3: Temperaturas nas interfaces para cerâmica escura e $T_i = 18 \,^{\circ}C$.

CERÂMICA ESCURA E TEMPERATURA INTERNA 18°C

CERÂ	MICA ES	SCURA E	TEMPE	RATURA	INTERN	A 18°C
Hora	text	Tc/ac	T _{AC/E}	T _{E/S}	T _{S/R}	Tint
0	28,40	28,16	27,60	26,56	19,04	18,00
1	27,30	27,09	26,59	25,66	18,93	18,00
2	26,10	25,92	25,48	24,67	18,81	18,00
3	26,70	26,50	26,03	25,16	18,87	18,00
4	26,20	26,01	25,57	24,75	18,82	18,00
5	24,60	24,45	24,09	23,43	18,66	18,00
6	24,30	24,16	23,82	23,19	18,63	18,00
7	24,64	24,49	24,13	23,47	18,66	18,00
8	24,91	24,75	24,38	23,69	18,69	18,00
9	24,91	24,75	24,38	23,69	18,69	18,00
10	27,18	26,97	26,48	25,56	18,92	18,00
11	29,67	29,40	28,78	27,61	19,17	18,00
12	31,08	30,78	30,08	28,77	19,31	18,00
13	39,41	38,92	37,77	35,63	20,14	18,00
14	52,77	51,98	50,10	46,62	21,48	18,00
15	59,44	58,50	56,26	52,12	22,15	18,00
16	60,90	59,92	57,61	53,32	22,29	18,00
17	52,57	51,78	49,92	46,46	21,46	18,00
18	36,17	35,76	34,78	32,96	19,82	18,00
19	34,90	34,52	33,60	31,91	19,69	18,00
20	34,40	34,03	33,14	31,50	19,64	18,00
21	33,50	33,15	32,31	30,76	19,55	18,00
22	32,10	31,78	31,02	29,61	19,41	18,00
23	31,00	30,70	30,00	28,70	19,30	18,00

CÁLCULO DO TRANSIENTE TÉRMICO VIA MÉTODO ANALÍTICO

O objetivo é apresentar uma formulação matemática que represente como ocorre a distribuição da temperatura em um sistema de revestimento cerâmico de uma fachada em que a face externa é exposta à temperatura ambiente e a face interna à temperatura de 18°C e 25°C, por meio de métodos analíticos. A formulação matemática e a resolução das equações de transferência de calor (método analítico) são conforme os procedimentos matemáticos realizados no trabalho de Barbosa (2013) que avaliou o comportamento de um sistema de revestimento cerâmico de uma fachada submetido a um carregamento térmico descrito por choque térmico.

Foi utilizado o aplicativo MAPLE para a resolução da formulação de expressões matemáticas analíticas de distribuição de temperatura que descrevem a movimentação das temperaturas nas interfaces da parede equivalente composta de cinco camadas de materiais, conforme composição de um sistema de revestimento cerâmico de uma fachada em (1) reboco, (2) substrato, (3) emboço, (4) argamassa colante e (5) cerâmica, apresentado no Item 3.1.

Segundo Barbosa (2013), a formulação com camada equivalente, por ser camada única, não apresentou discrepâncias no cálculo da temperatura na interface entre as diferentes camadas como ocorreu na formulação de sólido composto de cinco materiais sobrepostos. Assim sendo, uma formulação com camada equivalente, para o caso de parede composta de cinco camadas, mostrou-se bem sucedida ao produzir resultados equivalentes aos obtidos na abordagem da parede com as cinco camadas sobrepostas.

Diante dessa constatação, neste trabalho adotou-se o caso de parede equivalente, composta das mesmas cinco camadas adotadas no trabalho de Barbosa (2013), pois essa formulação, além de ser mais simples, produz resultados tão precisos quanto a formulação considerando o caso de parece com as cinco camadas sobrepostas.

No item seguinte descreve-se detalhadamente as propriedades físicas dos materiais e demais variáveis (temperatura externa, radiação solar, cor da cerâmica, entre outras) estabelecidas como premissas para o estudo analítico e a formulação matemática da equação de cálculo do transiente térmico para uma parede de revestimento cerâmico de fachada. Tal parede está

inserida em um ambiente no qual a temperatura de sua face voltada para o interior está em contato com ar de temperatura controlada e constante, enquanto a face voltada para o exterior está em contato com ar cuja temperatura é variável ao longo do dia. Além disso, na face voltada para o exterior há a incidência do sol fornecendo energia térmica (Transiente Térmico) em níveis que variam durante o dia todo.

Ao final deste apêndice, são apresentados os valores dos transientes térmicos em cada interface das camadas da placa de revestimento cerâmico, calculados pela resolução da formulação matemática no aplicativo MAPLE, considerando os quatro casos de estudo elaborados a partir das variáveis cor da cerâmica e temperatura externa observada ao longo de um dia.

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO TRANSIENTE TÉRMICO

Para resolver analiticamente o problema do cálculo do transiente térmico de uma parede de revestimento cerâmico de uma fachada é necessário converter esse revestimento composto de apenas um material, em uma parede equivalente a um sólido composta de cinco materiais: reboco, substrato, emboço, argamassa colante e cerâmica. Assim sendo, para o cálculo das propriedades de condutividade térmica, densidade e capacidade térmica dessa parede equivalente, formada por cinco materiais, e que representa uma parede de revestimento cerâmico de uma fachada, é necessário conhecer as propriedades físicas dos materiais de cada camada, conforme apresentado na Tabela A.9 e extraído de Barbosa (2013).

Tabela A.9 – Propriedades do material de cada camada do revestimento cerâmico.

Material	Espessura (m)	Condutividade Térmica (KXX em w/m°C)	Massa Específica (DENS. em kg/m³)	Calor Específico (C em J/kg°C)	Difusividade Térmica (m²/seg)
Reboco	0,0200	1,40	$2,31 \times 10^3$	1000	6,061x10 ⁻⁷
Substrato	0,2000	1,16	$1,79 \times 10^3$	1000	$6,480 \times 10^{-7}$
Emboço	0,0200	1,40	$2,31 \times 10^3$	1000	6,061x10 ⁻⁷
Argamassa Colante	0,0050	0,84	$1,68 \times 10^3$	1000	$5,000 \times 10^{-7}$
Cerâmica	0,0065	2,00	$2,51 \times 10^3$	920	8,661x10 ⁻⁷

A proposta é substituir os parâmetros que definem a condução térmica da parede do revestimento cerâmico por parâmetros equivalentes ao material de cada uma das cinco interfaces que representam, aproximadamente, a parede toda. Em seguida, utilizando-se o conceito de Resistência Térmica Equivalente pode-se chegar ao conceito de Condutividade Térmica Equivalente (K_{eq}) definido pela Equação A.17, onde o parâmetro d representa a espessura total do revestimento cerâmico, no caso, 0.2515, os parâmetros l_i são as espessuras das camadas que formam o revestimento cerâmico, e os parâmetros K_i são as condutividades térmicas das camadas.

$$K_{eq} = \frac{d}{\frac{l_1}{K_1} + \frac{l_2}{K_2} + \frac{l_3}{K_2} + \frac{l_4}{K_4} + \frac{l_5}{K_5}}$$
(A.17)

Da mesma forma, tem-se a Densidade Equivalente (ρ_{eq}) definida pela Equação A.18, na qual os parâmetros ρ_i equivalem às densidades dos materiais em cada interface do revestimento cerâmico.

$$\rho_{eq} = \frac{\rho_1 l_1 + \rho_2 l_2 + \rho_3 l_3 + \rho_4 l_4 + \rho_5 l_5}{d}$$
(A.18)

Com relação à propriedade física Capacidade Térmica Específica, tem-se que os cinco materiais utilizados na parede de revestimento cerâmico possuem, basicamente, o mesmo valor de $1000 \text{J/Kg}^{\circ}\text{C}$ para esse parâmetro, com exceção do material cerâmica cujo valor é de $920 \text{J/Kg}^{\circ}\text{C}$. Assim sendo, o valor adotado para a Capacidade Térmica Específica Equivalente (s_{eq}) é de $1000 \text{J/Kg}^{\circ}\text{C}$.

O cálculo do transiente térmico da parede de revestimento cerâmico foi baseado em quatro casos de estudo apresentados na Tabela 6.1, avaliando-se valores definidos para os parâmetros de temperatura interna do ambiente (t_i) e de coeficiente de absorção térmica referente à cor da cerâmica na parte externa da parede do revestimento cerâmico.

Para o cálculo do Transiente Térmico em cada caso de estudo, foram utilizadas a temperatura do ar externo e a radiação solar registradas, ao longo do dia 28/10/2008, em Brasília. Esses dados foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Brasília e estão apresentados nas Tabelas 4.2 e A.1.

Utilizando o aplicativo computacional EXCEL foi possível transformar os dados de temperatura externa e radiação solar apresentados nas Tabelas 4.2 e A.1, em funções analíticas com razoável e satisfatória aproximação, aplicando-se a linha de tendência para cada intervalo de tempo (hora) com o objetivo de melhor representar a variação de temperatura durante o dia. Assim sendo, a partir das temperaturas do termômetro de máxima instantânea da Tabela 4.2, define-se 25 equações lineares, uma para cada hora e representando a temperatura antes de iniciar o transiente térmico. Para isso, leva-se em consideração, para efeitos do estudo realizado nesse trabalho, que o instante de tempo τ , expresso em segundos, é o instante a partir do qual o transiente térmico considerado começa a tomar lugar na parede e que, antes desse instante de tempo τ , a parede encontra-se em

regime estacionário de distribuição de temperatura. As Equações A.19 até A.43 representam as 25 equações lineares definidas a partir da temperatura externa do termômetro de máxima instantânea ao longo do dia 28/10/2008 em Brasília.

$$t - \tau < 0x3600 \text{ seg} \rightarrow U_0(t) = 28,4$$
 (A.19)

$$0x3600 \ seg \leq t - \tau < 1x3600 \ seg \rightarrow U_1(t) = 28.4 - 1.1 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.20}$$

$$1x3600 \ seg \le t - \tau < 2x3600 \ seg \to U_2(t) = 28.4 - 1.2 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.21}$$

$$2x3600 \ seg \le t - \tau < 3x3600 \ seg \to U_3(t) = 24.9 + 0.6 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.22)

$$3x3600 \text{ seg} \le t - \tau < 4x3600 \text{ seg} \to U_4(t) = 28.2 - 0.5 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.23)

$$4x3600 \ seg \le t - \tau < 5x3600 \ seg \to U_5(t) = 32.6 - 1.6 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.24)

$$5x3600 \ seg \le t - \tau < 6x3600 \ seg \to U_6(t) = 26,1 - 0,3\left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.25)

$$6x3600 \ seg \le t - \tau < 7x3600 \ seg \to U_7(t) = 29,1 - 0,8\left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.26}$$

$$7x3600 \ seg \le t - \tau < 8x3600 \ seg \to U_8(t) = 25.6 - 0.3 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.27)

$$8x3600 \ seg \le t - \tau < 9x3600 \ seg \to U_9(t) = 25.6 - 0.3 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.28}$$

$$9x3600 \ seg \le t - \tau < 10x3600 \ seg \to U_{10}(t) = 4.9 + 2\left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.29)

$$10x3600 \ seg \le t - \tau < 11x3600 \ seg \to U_{11}(t) = 1.9 + 2.3 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.30)

$$11x3600 \ seg \le t - \tau < 12x3600 \ seg \to U_{12}(t) = 12,9 + 1,3\left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.31}$$

$$12x3600 \ seg \leq t - \tau < 13x3600 \ seg \rightarrow U_{13}(t) = -0.3 + 2.4 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \eqno(3.32)$$

$$13x3600 \ seg \le t - \tau < 14x3600 \ seg \to U_{14}(t) = 11.4 + 1.5 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{3.33}$$

$$14x3600 \ seg \le t - \tau < 15x3600 \ seg \to U_{15}(t) = 15.6 + 1.2 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{3.34}$$

$$15x3600 \ seg \le t - \tau < 16x3600 \ seg \to U_{16}(t) = 18,6 + \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.35}$$

$$16x3600 \ seg \le t - \tau < 17x3600 \ seg \to U_{17}(t) = 25 + 0.6 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.36}$$

$$17x3600 \ seg \le t - \tau < 18x3600 \ seg \to U_{18}(t) = 33.5 + 0.1 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.37}$$

$$18x3600 \ seg \le t - \tau < 19x3600 \ seg \to U_{19}(t) = 42.5 - 0.4 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.38}$$

$$19x3600 \ seg \le t - \tau < 20x3600 \ seg \to U_{20}(t) = 44.5 - 0.5 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.39}$$

$$20x3600 \ seg \le t - \tau < 21x3600 \ seg \to U_{21}(t) = 52.4 - 0.9 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.40}$$

$$21x3600 \text{ seg} \le t - \tau < 22x3600 \text{ seg} \rightarrow U_{22}(t) = 62.9 - 1.4\left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.41)

$$22x3600 \ seg \le t - \tau < 23x3600 \ seg \to U_{23}(t) = 56,3 - 1,1\left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.42}$$

$$23x3600 \text{ seg} \le t - \tau < 24x3600 \text{ seg} \rightarrow U_{24}(t) = 90.8 - 2.6 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.43)

De forma semelhante, as Equações A.44 até A.67 representam as 25 equações lineares definidas a partir da radiação solar incidente ao longo do dia 28/10/2008 em Brasília.

$$t - \tau < 0x3600 \text{ seg} \to I_{a0}(t) = 0 \tag{A.44}$$

$$0x3600 \ seg \le t - \tau < 1x3600 \ seg \to I_{g1}(t) = 0$$
 (A.45)

$$1x3600 \ seg \le t - \tau < 2x3600 \ seg \to I_{g2}(t) = 0 \tag{A.46}$$

$$2x3600 \ seg \le t - \tau < 3x3600 \ seg \to I_{g3}(t) = 0 \tag{A.47}$$

$$3x3600 \text{ seg} \le t - \tau < 4x3600 \text{ seg} \rightarrow I_{g4}(t) = 0$$
 (A.48)

$$4x3600 \ seg \le t - \tau < 5x3600 \ seg \rightarrow I_{g5}(t) = 0$$
 (A.49)

$$5x3600 \text{ seg} \le t - \tau < 6x3600 \text{ seg} \to I_{a6}(t) = 0$$
 (A.50)

$$6x3600 \ seg \le t - \tau < 7x3600 \ seg \to I_{g7}(t) = -180 + 30 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.51}$$

$$7x3600 \ seg \le t - \tau < 8x3600 \ seg \to I_{g8}(t) = -75 + 15\left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.52)

$$8x3600 \ seg \le t - \tau < 9x3600 \ seg \to I_{g9}(t) = -19 + 8\left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.53)

$$9x3600 \ seg \le t - \tau < 10x3600 \ seg \to I_{g10}(t) = -10 + 7\left(\frac{t - \tau}{3600}\right)$$
 (A.54)

$$10x3600 \ seg \le t - \tau < 11x3600 \ seg \to I_{g11}(t) = 10 + 5\left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.55}$$

$$11x3600 \ seg \le t - \tau < 12x3600 \ seg \to I_{g12}(t) = 32 + 3\left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.56}$$

$$12x3600 \ seg \le t - \tau < 13x3600 \ seg \to I_{g13}(t) = -1804 + 156 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.57}$$

$$13x3600 \ seg \le t - \tau < 14x3600 \ seg \to I_{g14}(t) = -3832 + 312 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.57}$$

$$14x3600 \ seg \leq t - \tau < 15x3600 \ seg \rightarrow I_{g15}(t) = -1480 + 144 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \eqno(A.58)$$

$$15x3600 \ seg \le t - \tau < 16x3600 \ seg \to I_{g16}(t) = 500 + 12\left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.59}$$

$$16x3600 \ seg \le t - \tau < 17x3600 \ seg \to I_{g17}(t) = 4452 - 235 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.60}$$

$$17x3600 \ seg \le t - \tau < 18x3600 \ seg \to I_{g18}(t) = 7835 - 434 \left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.61}$$

$$18x3600 \ seg \le t - \tau < 19x3600 \ seg \to I_{g19}(t) = 437 - 23\left(\frac{t - \tau}{3600}\right) \tag{A.62}$$

$$19x3600 \ seg \le t - \tau < 20x3600 \ seg \to I_{g20}(t) = 0 \tag{A.63}$$

$$20x3600 \ seg \le t - \tau < 21x3600 \ seg \to I_{a21}(t) = 0 \tag{A.64}$$

$$21x3600 \text{ seg} \le t - \tau < 22x3600 \text{ seg} \rightarrow I_{a22}(t) = 0$$
 (A.65)

$$22x3600 \ seg \le t - \tau < 23x3600 \ seg \to I_{g23}(t) = 0$$
 (A.66)

$$23x3600 \ seg \le t - \tau < 24x3600 \ seg \to I_{a24}(t) = 0 \tag{A.67}$$

Considera-se, ainda, o parâmetro coeficiente de absorção térmica para as cerâmicas clara e escura, apresentado na Tabela A.2, conforme Uchôa (2007). Porém, como a propriedade difusividade térmica dos materiais, apresentada na Tabela A.9, já é representada pela letra α , então o parâmetro coeficiente de absorção térmica será representado pela letra γ .

Além disso, a definição dos valores para a condutância superficial exterior da parede (h_e) , também chamado coeficiente de transferência térmica ou coeficiente de convecção térmica, e que representa um parâmetro do ar exterior à edificação e, a condutância superficial interior da parede (h_i) , um parâmetro do ar interior à edificação, utilizados neste trabalho, foi baseada em Uchôa (2007) e representam, respectivamente, 18W/m^2 °C e 9W/m^2 °C. Conforme

explica Farlow (1982), os parâmetros denominados coeficiente de transferência térmica externo (h_e) e interno (h_i) são de difícil mensuração e, preferencialmente, deveriam ser obtidos de forma experimental, o que não é o foco desse trabalho.

Uchôa (2007) apresenta em seu trabalho uma tabela com os valores médios de h_e em função da velocidade do vento para os cinco tipos de ventos predominantes. Esses valores estão apresentados na Tabela A.10. O autor justifica que tais valores foram retirados de Frota e Schiffer (2003) e Rivero (1985) e o uso da média aritmética dos valores h_e apresentados na Tabela A.10, resulta no valor arredondado de 18W/m^2 °C, que representa o coeficiente de transferência térmica externo (h_e) da parede de revestimento cerâmico a ser adotado neste trabalho.

Tabela A.10 – Valores médios de h_e em função do tipo de vento.

Tipo de Vento	Velocidade do Vento (m/s)	h_e (W/m ² °C)
Ar Calmo	0,10	8
Velocidade muito fraca	0,50	10
Velocidade fraca	1,00	13
Velocidade média	3,00	21
Velocidade forte	9,00	35

A definição do coeficiente de transferência térmica interno (h_i) a ser adotado nesse trabalho, se baseou em Rosa (2001) que afirma que a velocidade do ar em ambientes com ventilação por deslocamento é geralmente baixa, menor que 0.2m/s, exceto nas plumas térmicas e no escoamento próximo aos difusores, ao piso e às paredes. Conforme o autor corre-se o risco de indesejável sensação de resfriamento nas proximidades do piso e dos difusores, já que nessas regiões há alta velocidade do ar e baixas temperaturas. Ainda, segundo Rosa (2001), após simular um ambiente interno, insuflado com jatos de ar na vertical e horizontal, determinou linhas caracterizadas pelos isovalores do módulo de velocidade dentro do ambiente. Próximo à parede, a velocidade do ar máxima observada foi de, aproximadamente, 0.25m/s. Portanto, baseado na Tabela A.10 adotou-se utilizar para o coeficiente de transferência térmica interno (h_i) , o valor de $9\text{W/m}^{20}\text{C}$.

A partir da definição dos valores de h_e e h_i como sendo $18\text{W/m}^2\text{°C}$ e $9\text{W/m}^2\text{°C}$, respectivamente, pode-se começar a resolver o problema definido por sua equação diferencial (Equação A.68) e condições de contorno (Equações A.69 e A.70).

$$\alpha_{eq} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial U}{\partial t} \tag{A.68}$$

$$-K_{eq} \frac{\partial U(d,t)}{\partial x} = h_e (U(d,t) - U_{\infty}(t)) - \gamma I_g(t)$$
(A.69)

$$-K_{eq} \frac{\partial U(0,t)}{\partial x} = h_i \big(U_i - U(0,t) \big) \tag{A.70}$$

Trata-se de um problema com condições de contorno variáveis no tempo, o que fará com que o regime estacionário também seja variável no tempo. Na sequência, o método descrito em Farlow (1982) é normalmente empregado, rearranjando as condições de contorno (Equações A.71 e A.72).

$$\frac{\partial U(d,t)}{\partial x} + \frac{h_e}{K_{eq}}U(d,t) = \frac{h_e}{K_{eq}}U_{\infty}(t) + \frac{\gamma}{K_{eq}}I_g(t) = g_2(t) \tag{A.71}$$

$$\frac{\partial U(0,t)}{\partial x} - \frac{h_i}{K_{eq}} U(0,t) = -\frac{h_i}{K_{eq}} U_i = g_1(t)$$
 (A.72)

Conforme o método descrito em Farlow (1982) é necessário transformar as condições de contorno, mostradas nas Equações A.71 e A.72, em condições de contorno homogêneas. Isso é feito transformando-se, também, a função de distribuição de temperatura original U(x,t) em uma soma de duas outras funções, dentre elas a função $\overline{U}(x,t)$. A relação será dada pela fórmula da Equação A.73

$$U(x,t) = S(x,t) + \overline{U}(x,t) = A(t)(1 - \frac{x}{d}) + B(t)(\frac{x}{d}) + \overline{U}(x,t)$$
(A.73)

Assim, pode-se determinar a função S(x, t) como sendo:

$$S(x,t) = A(t)(1 - \frac{x}{d}) + B(t)(\frac{x}{d})$$
 (A.74)

É possível notar, claramente, que a função S(x,t) é função de uma reta a qual representará o regime estacionário do problema, variável no tempo conforme predito, em virtude de as condições de contorno também o serem. Além disso, ambas as funções S(x,t) e $\overline{U}(x,t)$ obedecem às condições de contorno do problema original. Assim sendo, tem-se:

$$\begin{cases}
\frac{\partial S(d,t)}{\partial x} + \frac{\partial \overline{U}(d,t)}{\partial x} + \frac{h_e}{K_{eq}}S(d,t) + \frac{h_e}{K_{eq}}\overline{U}(d,t) = g_2(t) \\
\frac{\partial S(0,t)}{\partial x} + \frac{\partial \overline{U}(0,t)}{\partial x} - \frac{h_i}{K_{eq}}S(0,t) - \frac{h_i}{K_{eq}}\overline{U}(0,t) = g_1(t)
\end{cases}$$
(A.75)

$$\begin{cases} \frac{\partial S(d,t)}{\partial x} + \frac{h_e}{K_{eq}} S(d,t) = g_2(t) \\ \frac{\partial S(0,t)}{\partial x} - \frac{h_i}{K_{eq}} S(0,t) = g_1(t) \end{cases}$$
(A.76)

$$\begin{cases} \frac{\partial \overline{U}(d,t)}{\partial x} + \frac{h_e}{K_{eq}} \overline{U}(d,t) = 0\\ \frac{\partial \overline{U}(0,t)}{\partial x} - \frac{h_i}{K_{eq}} \overline{U}(0,t) = 0 \end{cases}$$
(A.77)

Resolvendo o sistema acima, tem-se que as funções A(t) e B(t) que são dadas por:

$$A(t) = \frac{K_{eq}[K_{eq}(g_2(t) - g_1(t)) - h_e dg_1(t)]}{K_{eq}(h_e + h_i) + dh_e h_i}$$
(A.78)

$$B(t) = \frac{K_{eq}[K_{eq}(g_2(t) - g_1(t)) + h_i dg_2(t)]}{K_{eq}(h_e + h_i) + dh_e h_i}$$
(A.79)

Portanto, temos que:

$$A(t) = \frac{K_{eq}(h_e U_{\infty}(t) + I_g(t)\gamma + h_i U_i) + dh_e h_i U_i}{K_{eg}(h_e + h_i) + dh_e h_i}$$
(A.80)

$$B(t) = \frac{K_{eq}(h_e U_{\infty}(t) + I_g(t)\gamma + h_i U_i) + h_i d(h_e U_{\infty}(t) + I_g(t)\gamma)}{K_{eq}(h_e + h_i) + dh_e h_i}$$
(A.81)

Substituindo as Equações A.80 e A.81 na equação diferencial principal (Equação A.68), temse que a nova equação transformada é:

$$\alpha_{eq} \frac{\partial^2 \overline{U}}{\partial x^2} - \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial \overline{U}}{\partial t}$$
 (A.82)

Com as seguintes condições de contorno:

$$\frac{\partial \overline{U}(d,t)}{\partial x} + \frac{h_e}{K_{eq}} \overline{U}(d,t) = 0$$
 (A.83)

$$\frac{\partial \overline{U}(0,t)}{\partial x} - \frac{h_i}{K_{eq}} \overline{U}(0,t) = 0 \tag{A.84}$$

Dessa forma, a homogeneização das condições de contorno foi alcançada. Por outro lado, a equação diferencial parcial principal deixou de ser homogênea. Sendo assim, deve-se recorrer a outro método diferente do método de separação de variáveis para resolvê-la. Conforme propõe Farlow (1982), tal equação diferencial parcial (EDP) deverá ser resolvida através da expansão dos autovetores (ou autofunções) da série de Fourier que representará a resposta do problema. Com o intuito de desenvolver a expansão dos autovetores da série de Fourier, primeiramente, é necessário considerar a EDP homogênea associada, com as mesmas condições de contorno:

$$\alpha_{eq} \frac{\partial^2 \overline{U}}{\partial x^2} = \frac{\partial \overline{U}}{\partial t} \tag{A.85}$$

Isso dará origem a um problema regular de *Sturm-Liouville*. A solução desse problema consistirá em uma combinação linear de autovetores e autovalores. Os autovalores determinarão as amplitudes dos modos de distribuição de temperatura. Estamos interessados em descobrir exatamente esses autovetores e autovalores que surgirão ao considerarmos apenas a solução da variável x da EDP da Equação A.85. Assim sendo, o problema tornase:

$$\frac{d^2X}{dx^2} + \lambda^2 X = 0 \tag{A.86}$$

$$X'' + \lambda^2 X = 0 \tag{A.87}$$

Com as seguintes condições de contorno:

$$X'(d) + \frac{h_e}{K_{eq}}X(d) = 0 (A.88)$$

$$X'(0) - \frac{h_i}{K_{eq}}X(0) = 0 (A.89)$$

Observa-se que a Equação A.86 juntamente com as condições de contorno apresentadas nas Equações A.88 e A.89 caracterizam-se por serem um caso particular do problema regular de *Sturm-Liouville*, conforme citado previamente. Resolvendo a Equação A.87 da forma convencional e utilizando a segunda condição de contorno (Equação A.89) obtém-se:

$$X(x) = C \sin \lambda x + D \cos \lambda x \tag{A.90}$$

$$X(x) = C \sin \lambda x + C \frac{\lambda K_{eq}}{h_i} \cos \lambda x \tag{A.91}$$

$$D = C \frac{\lambda K_{eq}}{h_i} \tag{A.92}$$

Onde *C* é um coeficiente pertencente ao conjunto dos números Reais. Empregando, agora, a primeira condição de contorno (Equação A.88) obtém-se a seguinte relação:

$$\lambda \cos \lambda d - \frac{\lambda^2 K_{eq}}{h_i} \sin \lambda d + \frac{h_e}{K_{eq}} \sin \lambda d + \frac{\lambda h_e}{h_i} \cos \lambda d = 0$$
 (A.93)

A relação mostrada na Equação A.93 evidencia que podem ser obtidos infinitos valores para λ , os quais são os autovalores do problema de *Sturm-Liouville*. Entretanto, é mais conveniente definir tais valores numericamente quando da aplicação do caso prático, com um número de casas decimais adequado e suficiente para a precisão desejada na resposta final do problema. Dessa forma, temos que os autovalores e os autovetores do problema apresentado serão:

$$\lambda_n$$
 (A.94)

$$X_n(x) = \sin \lambda_n x + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h} \cos \lambda_n x \tag{A.95}$$

$$n = 1,2,...$$
 (A.96)

Haberman (1987) explica que a combinação linear de duas autofunções linearmente independentes é uma outra autofunção. Observando a Equação A.89 é possível notar que $X_n(x)$ é exatamente uma combinação de $\sin \lambda_n x$ e $\cos \lambda_n x$, duas autofunções linearmente independentes. Portanto, pode-se considerar as funções $X_n(x)$ como as autofunções do problema, cada uma delas associada a um único autovalor λ_n .

A função $U_{\infty}(t)$ que descreve o comportamento da temperatura do ar no tempo, e a função $I_g(t)$ da incidência solar devem ser separadas em intervalos, a fim de se realizar a integração por partes nos trechos de interesse. Além disso, deseja-se que o sólido esteja em regime estacionário de temperatura antes dos efeitos transientes. Portanto, conforme já explicado anteriormente, estipula-se como τ o instante em que os efeitos de distribuição transiente começam a atuar no sólido. Utilizando a função matemática de Heaviside (também

conhecida como função passo) e as funções mostradas nas Equações A.19 à A.67, pode-se escrever de forma simplificada as funções que representam as funções $U_{\infty}(t)$ e $I_g(t)$ como:

$$U_{\infty}(t) = U_0(t) + \sum_{n=1}^{24} (U_n(t) - U_{n-1}(t)) H[t - \tau - (n-1)3600]$$
 (A.97)

$$I_g(t) = I_{g0}(t) + \sum_{n=1}^{24} \left(I_{gn}(t) - I_{g(n-1)}(t) \right) H[t - \tau - (n-1)3600]$$
 (A.98)

Onde $H(t - \tau)$ é a função matemática de Heaviside (função passo) definida por:

$$H(t - \tau - (n-1)3600) = \begin{cases} 0, & t < \tau + (n-1)3600 \\ 1, & t \ge \tau + (n-1)3600 \end{cases}$$
(A.99)

Dessa forma, têm-se cinco intervalos de derivação ou integração para as funções $U_{\infty}(t)$ e $I_g(t)$. Assim sendo, tem-se que:

$$\begin{split} \frac{\partial S(x,t)}{\partial t} &= \frac{1}{K_{eq}(h_e + h_i) + dh_e h_i} \bigg[\left(K_{eq} h_e + h_e h_i x \right) \bigg(\frac{dU_{\infty}(t)}{dt} \\ &+ \frac{\gamma}{h_e} \frac{dI_g(t)}{dt} \bigg) \bigg] \end{split} \tag{A.100}$$

$$f(x,t) = \frac{\partial S(x,t)}{\partial t} \tag{A.101}$$

O próximo passo é escrever a função f(x,t) em termos de Série de Fourier utilizando os autovalores encontrados. Tem-se que:

$$X_n(x) = \sin \lambda_n x + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x \tag{A.102}$$

$$f(x,t) = f_1(t)X_1(x) + f_2(t)X_2(x) + \dots + f_n(t)X_n(x)$$
(A.103)

$$f(x,t) = f_1(t) \sin \lambda_1 x + f_1(t) \frac{\lambda_1 K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_1 x + \dots + f_n(t) \sin \lambda_n x$$

$$+ f_n(t) \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x$$
(A.104)

$$f(x,t) = f_1(t) \left(\sin \lambda_1 x + \frac{\lambda_1 K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_1 x \right) + \cdots + f_n(t) \left(\sin \lambda_n x + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x \right)$$
(A.105)

$$n = 1, 2, \dots$$
 (A.106)

Esse é um problema de *Sturm-Liouville* que originou uma série de autofunções associadas a autovalores, os quais obedecem às condições de contorno elencadas, já que foram obtidos a partir das próprias condições de contorno. Conforme Haberman (1987), um dos teoremas acerca dos autovalores e autofunções do problema de *Sturm-Liouville* é que autofunções associadas a autovalores diferentes são relativamente ortogonais à "função peso" $\sigma(x)$ que, no caso particular do problema em questão, vale 1. Portanto:

$$\int_{0}^{d} X_{n}(x)X_{m}(x)\sigma(x)dx = \int_{0}^{d} X_{n}(x)X_{m}(x)dx = 0 \qquad \text{se } \lambda_{n} \neq \lambda_{m}$$
 (A.107)

A partir da característica de ortogonalidade das autofunções, Haberman (1987) mostra que, dada uma Série de Fourier escrita com as autofunções, há uma fórmula para calcular os coeficientes de tal série. No caso particular do problema em resolução nesse capítulo, a fórmula consiste em:

$$f_n(t) = \frac{\int_0^d f(x, t) X_n(x) dx}{\int_0^d X_n^2(x) dx}$$
(A.108)

Sendo assim, conforme Haberman (1987):

$$f_{n}(t) \int_{0}^{d} \left(\sin \lambda_{n} x + \frac{\lambda_{n} K_{eq}}{h_{i}} \cos \lambda_{n} x \right)^{2} dx = \int_{0}^{d} f(x, t) (\sin \lambda_{n} x + \frac{\lambda_{n} K_{eq}}{h_{i}} \cos \lambda_{n} x) dx$$

$$f_{n}(t) \left(\frac{2\lambda_{n} K_{eq} h_{i} (\sin^{2} \lambda_{n} d) + \left(\lambda_{n}^{2} K_{eq}^{2} - h_{i}^{2} \right) \sin \lambda_{n} d \cos \lambda_{n} d + \lambda_{n} d \left(\lambda_{n}^{2} K_{eq}^{2} + h_{i}^{2} \right)}{2\lambda_{n} h_{i}^{2}} \right)$$

$$= \int_{0}^{d} f(x, t) (\sin \lambda_{n} x + \frac{\lambda_{n} K_{eq}}{h_{i}} \cos \lambda_{n} x) dx$$

$$= \frac{h_{e} \frac{dU_{\infty}(t)}{dt} + \gamma \frac{dI_{g}(t)}{dt}}{(K_{eq}(h_{e} + h_{i}) + dh_{e} h_{i}) \lambda_{n}^{2} h_{i}} \left[(\sin \lambda_{n} d) \left(\lambda_{n}^{2} K_{eq}^{2} + h_{i}^{2} + \lambda_{n}^{2} K_{eq} h_{i} d \right) - \lambda_{n} h_{i}^{2} d \cos \lambda_{n} d \right]$$

$$(A.111)$$

Obviamente, o valor de $f_n(t)$ surge a partir da utilização das Equações A.110 e A.111, o que gera grande quantidade de caracteres:

$$f_{n}(t) = \left(\frac{2\lambda_{n}h_{i}^{2}}{2\lambda_{n}K_{eq}h_{i}(\sin^{2}\lambda_{n}d) + (\lambda_{n}^{2}K_{eq}^{2} - h_{i}^{2})\sin\lambda_{n}d\cos\lambda_{n}d + \lambda_{n}d(\lambda_{n}^{2}K_{eq}^{2} + h_{i}^{2})}\right) \frac{h_{e}\frac{dU_{\infty}(t)}{dt} + \gamma\frac{dI_{g}(t)}{dt}}{(K_{eq}(h_{e} + h_{i}) + dh_{e}h_{i})\lambda_{n}^{2}h_{i}} [(\sin\lambda_{n}d)(\lambda_{n}^{2}K_{eq}^{2} + h_{i}^{2} + \lambda_{n}^{2}K_{eq}h_{i}d) - \lambda_{n}h_{i}^{2}d\cos\lambda_{n}d]$$
(A.112)

Uma vez que a função f(x,t) foi expandida em Série de Fourier considerando os autovalores e autofunções obtidos para a equação homogênea associada ao problema, volta-se a atenção para a função $\overline{U}(x,t)$ que descreve o regime transiente do problema. Expandindo a função $\overline{U}(x,t)$ com os autovetores encontrados, anteriormente, tem-se que:

$$\overline{U}(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) X_n(x)$$
(A.113)

$$\overline{U}(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \sin \lambda_n x + T_n(t) \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x$$
(A.114)

Onde as funções $T_n(t)$ representam as amplitudes modais dos autovetores. Sendo assim, considerando, novamente, a EDP na Equação A.68, pode-se reescrevê-la da seguinte forma:

$$-\sum_{n=1}^{\infty} T_n(t)\alpha_{eq}\lambda_n^2 \sin \lambda_n x - \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t)\alpha_{eq}\lambda_n^3 \frac{K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x - \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \sin \lambda_n x$$

$$-\sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x$$

$$= \sum_{n=1}^{\infty} \dot{T}_n(t) \sin \lambda_n x + \sum_{n=1}^{\infty} \dot{T}_n(t) \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x$$
(A.115)

Rearranjando a fórmula tem-se:

$$\sum_{n=1}^{\infty} (\dot{T}_n(t) + T_n(t)\alpha_{eq}\lambda_n^2 + f_n(t)) \sin \lambda_n x + \sum_{n=1}^{\infty} (\dot{T}_n(t) + T_n(t)\alpha_{eq}\lambda_n^2 + f_n(t)) \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x = 0$$
(A.116)

Logo, a relação anterior será sempre respeitada caso a seguinte identidade se verifique:

$$\dot{T}_n(t) + T_n(t)\alpha_{eq}\lambda_n^2 + f_n(t) = 0$$
(A.117)

A equação acima é uma equação diferencial ordinária (EDO) de primeira ordem, cuja resolução é bem conhecida. Entretanto, a condição inicial do problema encontra-se ausente, devendo ser estabelecida. Voltando-se à equação principal:

$$\alpha_{eq} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial U}{\partial t} \tag{A.118}$$

Tem-se que, inicialmente, quando t = 0, a distribuição de temperatura é dada por:

$$U(x,0) = \phi(x) \tag{A.119}$$

De forma conveniente, escolhe-se o valor de 0 para a função $\phi(x)$ possibilitando a obtenção dos coeficientes da Série de Fourier do regime estacionário utilizando $\bar{\phi}(x)$ na integração. Nesse caso, a transformação de variáveis por causa da não homogeneidade das condições de contorno resulta na seguinte condição inicial:

$$\overline{U}(x,0) = \phi(x) - S(x,0) = \overline{\phi}(x)$$
 (A.120)

Escolhendo $\phi(x) = 0$, obtém-se:

$$\overline{U}(x,0) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(0) \sin \lambda_n x + \sum_{n=1}^{\infty} T_n(0) \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x = -S(x,0) = \overline{\phi}(x)$$
(A.121)

$$T_n(0) \left(\int_0^d \left(\sin \lambda_n x + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x \right)^2 dx \right)$$

$$= -\int_0^d S(x,0) (\sin \lambda_n x + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x) dx$$
(A.122)

$$T_{n}(0) = -\left(\int_{0}^{d} \left(\sin \lambda_{n} x + \frac{\lambda_{n} K_{eq}}{h_{i}} \cos \lambda_{n} x\right)^{2} dx\right)^{-1} \int_{0}^{d} S(x,0)(\sin \lambda_{n} x)$$

$$+ \frac{\lambda_{n} K_{eq}}{h_{i}} \cos \lambda_{n} x) dx T_{n}(0)$$

$$= -\left(\int_{0}^{d} \left(\sin \lambda_{n} x + \frac{\lambda_{n} K_{eq}}{h_{i}} \cos \lambda_{n} x\right)^{2} dx\right)^{-1} \int_{0}^{d} S(x,0)(\sin \lambda_{n} x)$$

$$+ \frac{\lambda_{n} K_{eq}}{h_{i}} \cos \lambda_{n} x) dx$$

$$(A.123)$$

A fórmula de $T_n(0)$, apesar de indicada, não será calculada, pois como será visto a seguir, em virtude de a modelagem fixar que o sólido estará no regime estacionário de distribuição de temperatura antes de iniciar o transiente térmico, a distribuição inicial não influenciará

no resultado final do problema. Pode-se, então, partir para a resolução da EDO na Equação A.117. Usando o fator de integração $e^{-\alpha_{eq}\lambda_n^2 t}$ na resposta, tem-se que:

$$T_n(t) = T_n(0)e^{-\alpha_{eq}\lambda_n^2 t} - \int_0^t e^{-\alpha_{eq}\lambda_n^2 (t-\xi)} f_n(\xi) d\xi$$
 (A.124)

Onde se pode calcular:

$$\int_{0}^{t} e^{-\alpha_{eq}\lambda_{n}^{2}(t-\xi)} f_{n}(\xi) d\xi =$$

$$f_{n}(t) = \begin{cases} = \left(\frac{2\lambda_{n}h_{i}^{2}\left[(\sin\lambda_{n}d)\left(\lambda_{n}^{2}K_{eq}^{2} + h_{i}^{2} + \lambda_{n}^{2}K_{eq}h_{i}d\right) - \lambda_{n}h_{i}^{2}d\cos\lambda_{n}d\right]}{2\lambda_{n}K_{eq}h_{i}(\sin^{2}\lambda_{n}d) + \left(\lambda_{n}^{2}K_{eq}^{2} - h_{i}^{2}\right)\sin\lambda_{n}d\cos\lambda_{n}d + \lambda_{n}d\left(\lambda_{n}^{2}K_{eq}^{2} + h_{i}^{2}\right)}\right)} \\ = \frac{\int_{0}^{t}e^{-\alpha_{eq}\lambda_{n}^{2}(t-\xi)}\left(h_{e}\frac{dU_{\infty}(\xi)}{d\xi} + \gamma\frac{dI_{g}(\xi)}{d\xi}\right)d\xi}{(K_{eq}(h_{e} + h_{i}) + dh_{e}h_{i})\lambda_{n}^{2}h_{i}} \end{cases}$$
(A.125)

Podem-se chamar os coeficientes da Série de Fourier de $CF_n(t)$:

$$CF_n(t) = \int_0^t e^{-\alpha_{eq}\lambda_n^2(t-\xi)} f_n(\xi) d\xi$$
 (A.126)

Portanto, a função $\overline{U}(x,t)$ vale:

$$\overline{U}(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(0)e^{-\alpha_{eq}\lambda_n^2 t} \left(\sin \lambda_n x + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x \right) \\
- \sum_{n=1}^{\infty} CF_n(t) \left(\sin \lambda_n x + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x \right) \tag{A.127}$$

Revertendo a transformação feita na Equação 1.59, temos que a função U(x,t) é dada por:

$$U(x,t) = S(x,t) + \overline{U}(x,t) \tag{A.128}$$

$$U(x,t) = S(x,t) + \sum_{n=1}^{\infty} T_n(0)e^{-\alpha_{eq}\lambda_n^2 t} \left(\sin \lambda_n x + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x \right)$$

$$- \sum_{n=1}^{\infty} CF_n(t) \left(\sin \lambda_n x + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x \right)$$
(A.129)

$$S(x,t) = \frac{1}{K_{eq}(h_e + h_i) + dh_e h_i} \{ I_g(t) \gamma K_{eq} + h_e K_{eq} U_{\infty}(t) + U_i dh_e h_i + h_i K_{eq} U_i + \left[-U_i h_e h_i + I_g(t) \gamma h_i + U_{\infty}(t) h_e h_i \right] x \}$$
(A.130)

Fixa-se o instante τ como sendo tardio o suficiente para que, imediatamente antes do transiente térmico, o sólido já esteja em regime estacionário de distribuição de temperatura. Dessa forma, pode-se escrever que:

$$t < \tau \rightarrow CF_n(t) = 0$$

$$t < \tau \to U(x,t) = U(x)$$

$$= \frac{1}{K_{eq}(h_e + h_i) + dh_e h_i} \{ I_g(\tau) \gamma K_{eq} + h_e K_{eq} U_{\infty}(\tau) + U_i dh_e h_i + h_i K_{eq} U_i + [-U_i h_e h_i + I_g(\tau) \gamma h_i + U_{\infty}(\tau) h_e h_i] x \}$$
(A.131)

$$t \geq \tau \rightarrow U(x,t)$$

$$= \frac{1}{K_{eq}(h_e + h_i) + dh_e h_i} \{ I_g(t) \gamma K_{eq} + h_e K_{eq} U_{\infty}(t) + U_i dh_e h_i$$

$$+ h_i K_{eq} U_i + \left[-U_i h_e h_i + I_g(t) \gamma h_i + U_{\infty}(t) h_e h_i \right] x \}$$

$$- \sum_{n=1}^{\infty} CF_n(t) \left(\sin \lambda_n x + \frac{\lambda_n K_{eq}}{h_i} \cos \lambda_n x \right)$$
(A.132)

O item a seguir apresenta a resolução dessa formulação matemática no aplicativo MAPLE e os resultados obtidos para os transientes térmicos em cada camada da parede equivalente que representa o sistema de revestimento cerâmico dos quatro casos de estudo.

CÁLCULO DOS TRANSIENTES TÉRMICOS PARA OS CASOS DE ESTUDO

Com o objetivo de calcular o transiente térmico para os quatro casos de estudo mencionados na Tabela 4.7, por meio da resolução da formulação matemática, utilizou-se o aplicativo MAPLE, informando como dados de entrada apenas o parâmetro γ do coeficiente de absorção de radiação solar (valores 0,45 e 0,95, respectivamente para cerâmica clara e cerâmica escura, conforme apresentado na Tabela A.2), a temperatura interna de 18°C e 25°C e a hora do dia. Como resultado da execução do MAPLE obtém-se as temperaturas em cada uma das camadas da parede equivalente que representa o sistema de revestimento cerâmico de uma fachada composta de cinco camadas (temperatura externa (t_{ext}), temperatura nas interfaces cerâmica/argamassa colante (t_{C/AC}), argamassa colante/emboço (t_{AC/E}), emboço/substrato (t_{E/S}) e substrato/reboco interno (t_{S/R}) e temperatura interna (t_{int})). Assim sendo, executou-se 24 vezes o programa no MAPLE para cada um dos quatro casos de estudo, com o objetivo de levantar os transientes térmicos das camadas da parede equivalente nas 24 horas do dia para um caso.

Assim sendo, pode-se calcular a condutividade térmica equivalente (K_{eq}) e a densidade equivalente (ρ_{eq}), conforme Equações A.1 e A.2 e propriedades físicas do material das cinco camadas que formam a parede equivalente do sistema de revestimento cerâmico de uma fachada, mostradas na Tabela A.9. A capacidade térmica específica equivalente (s_{eq}) é de 1000 J/Kg °C.

$$K_{eq} = 1,196550114$$

$$\rho_{eq} = 1889,125249$$

E, a difusividade térmica equivalente (α_{eq}) é de:

$$\alpha_{eq} = 6{,}333884504.10^{-7}$$

Os autovalores em número suficiente para a precisão desejada no cálculo do transiente térmico estão apresentados na Tabela A.11 e foram obtidos numericamente por meio do aplicativo MAPLE e Equação A.80.

Tabela A.11: Tabela de autovalores do MAPLE.

	autovalores do MAPL
	ALORES λ _n
N	Valor
1	8,429677
2	18,02255
3	28,80963
4	40,31440
5	52,19708
6	64,28512
7	76,49274
8	88,77482
9	101,1060
10	113,4709
11	125,8602
12	138,2674
13	150,6883
14	163,1198
15	175,5597
16	188,0063
17	200,4584
18	212,9151
19	225,3756
20	237,8393
AUTOVA	ALORES λ_n
N	Valor
21	250,3058
22	262,7746
23	262,7746
24	287,7181
25	300,1923
26	312,6679
27	325,1446
28	337,6225
29	350,1013
30	362,5810
31	375,0614
32	387,5426
	387,5426 400,0244
32	·
32 33	400,0244
32 33 34	400,0244 412,5068
32 33 34 35	400,0244 412,5068 424,9897
32 33 34 35 36	400,0244 412,5068 424,9897 437,4731

40	487,4108
,	AUTOVALORES λ _n
N	Valor
41	499,8961
42	512,3817
43	524,8676
44	537,3537
45	549,8401
46	562,3267
47	574,8135
48	587,3005
49	599,7877
50	612,2750
51	624,7625
52	637,2502
53	649,7380
54	662,2260
55	674,7141
56	687,2023
57	699,6906
58	712,1790
59	724,6675
60	737,1562
	AUTOVALORES λ_n
N	AUTOVALORES λ_n Valor
N	Valor
N 61	Valor 749,6449
N 61 62	Valor 749,6449 762,1337
N 61 62 63	Valor 749,6449 762,1337 774,6226
N 61 62 63 64	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116
N 61 62 63 64 65	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006
N 61 62 63 64 65 66	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897
N 61 62 63 64 65 66	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789
N 61 62 63 64 65 66 67	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682
N 61 62 63 64 65 66 67 68	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682 849,5575
N 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682 849,5575 862,0469 874,5363 887,0258
N 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682 849,5575 862,0469 874,5363
N 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682 849,5575 862,0469 874,5363 887,0258
N 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682 849,5575 862,0469 874,5363 887,0258 899,5154
N 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682 849,5575 862,0469 874,5363 887,0258 899,5154 912,0050
N 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682 849,5575 862,0469 874,5363 887,0258 899,5154 912,0050 924,4946
N 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682 849,5575 862,0469 874,5363 887,0258 899,5154 912,0050 924,4946 936,9843
N 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682 849,5575 862,0469 874,5363 887,0258 899,5154 912,0050 924,4946 936,9843 949,4741
N 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76	Valor 749,6449 762,1337 774,6226 787,1116 799,6006 812,0897 824,5789 837,0682 849,5575 862,0469 874,5363 887,0258 899,5154 912,0050 924,4946 936,9843 949,4741 961,9638

N	Valor
81	999,43345
82	1011,9234
83	1024,4134
84	1036,9034
85	1049,3934
86	1061,8835
87	1074,3736
88	1086,8638
89	1099,3540
90	1111,8442
91	1124,3344
92	1136,8246
93	1149,3149
94	1161,8052
95	1174,2955
96	1186,7859
97	1199,2763
98	1211,7667
99	1224,2571
100	1236,7475
AUTOVA	LORES λ_n
N	Valor
101	1249,2380
102	1261,7284
103	1274,2189
104	1286,7094
105	1299,2000
106	1311,6905
107	1324,1811
108	1336,6717
109	1349,1623
110	1361,6529
111	1374,1435
442	1296 6241
112	1380,0341
	1386,6341 1399,1248
112 113 114	1399,1248 1411,6154
113	1399,1248 1411,6154
113 114	1399,1248
113 114 115	1399,1248 1411,6154 1424,1061
113 114 115 116	1399,1248 1411,6154 1424,1061 1436,5968 1449,0875
113 114 115 116 117	1399,1248 1411,6154 1424,1061 1436,5968

Para o CASO 1, a partir dos dados de $\gamma = 0.45$ (cerâmica clara) e temperatura interna $U_i = 18^{\circ}C$, obtemos os transientes térmicos nas interfaces das cinco camadas da parede equivalente que representa o sistema de revestimento cerâmico de uma fachada, conforme apresentados na Figura A.2 e na Tabela A.12.

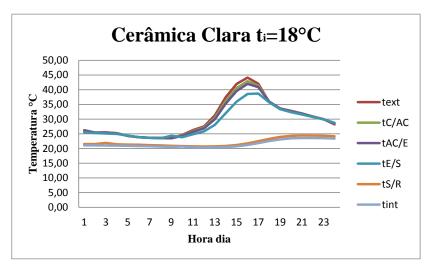


Figura A.2 – Caso 1: Gráfico do transiente térmico analítico.

Tabela A.12 – Transientes Térmicos para o CASO 1.

CA	CASO 1: CERÂMICA CLARA E TEMPERATURA INTERNA 18°C					
Hora	t _{ext}	T _{C/AC}	T _{AC/E}	T _{E/S}	T _{S/R}	T _{int}
0	28,22	28,38	28,48	28,74	24,19	23,39
1	26,26	26,19	26,14	25,50	21,52	21,06
2	25,43	25,43	25,42	25,31	21,52	21,06
3	25,52	25,43	25,37	25,12	21,90	21,03
4	25,26	25,20	25,16	24,95	21,43	20,99
5	24,29	24,34	24,36	24,39	21,37	20,93
6	23,83	23,86	23,87	23,89	21,29	20,86
7	23,65	23,65	23,65	23,62	21,19	20,78
8	23,61	23,59	23,57	23,48	21,07	20,68
9	23,52	23,49	23,47	24,36	20,95	20,57
10	24,66	24,45	24,31	23,83	20,83	20,70
11	26,29	25,95	25,70	24,85	20,75	20,39
12	27,50	27,13	26,85	25,85	20,71	20,36
13	31,31	30,53	29,96	28,05	20,75	20,38
14	37,52	36,21	35,28	32,05	20,90	20,50
15	41,98	40,62	39,61	35,97	21,22	20,77
16	44,11	42,91	42,00	38,58	21,77	21,23
17	42,05	41,41	40,90	38,69	22,51	21,87
18	35,79	35,95	36,00	35,71	23,30	22,56
19	33,64	33,63	33,61	33,39	23,93	23,12
20	32,81	32,74	32,68	32,35	24,30	23,46
21	31,95	31,90	31,85	31,57	24,44	23,59
22	30,90	30,90	30,89	30,74	24,43	23,59
23	29,95	29,97	29,98	29,92	24,34	23,52

Para o CASO 2, a partir dos dados de $\gamma=0.45$ (cerâmica clara) e temperatura interna $U_i=25^{\circ}C$, obtemos os transientes térmicos nas interfaces das cinco camadas da parede equivalente que representa o sistema de revestimento cerâmico de uma fachada, conforme apresentado na Tabela A.13.

Tabela A.13 – Transientes Térmicos para o CASO 2.

CASO 2: CERÂMICA CLARA E TEMPERATURA INTERNA 25°C						
Hora	t _{ext}	T _{C/AC}	T _{AC/E}	T _{E/S}	T _{S/R}	T _{int}
0	29,25	29,51	29,69	30,26	28,81	28,33
1	27,29	27,33	27,35	27,37	26,15	26,00
2	26,47	26,57	26,63	26,83	26,14	25,99
3	26,55	26,57	26,58	26,64	26,11	25,97
4	26,29	26,34	26,37	26,47	26,06	25,92
5	25,32	25,47	25,57	25,91	26,00	25,87
6	24,86	24,99	25,08	25,41	25,92	25,80
7	24,69	24,79	24,86	25,14	25,81	25,71
8	24,64	24,72	24,78	25,00	25,70	25,61
9	24,55	24,62	24,68	24,88	25,58	25,51
10	25,69	25,59	25,52	25,35	25,46	25,41
11	27,32	27,08	26,91	26,37	25,37	25,33
12	28,54	28,26	28,06	27,37	25,34	25,29
13	32,34	31,66	31,17	29,57	25,38	25,32
14	38,55	37,35	36,49	33,57	25,52	25,44
15	43,01	41,75	40,82	37,49	25,85	25,70
16	45,14	44,04	43,21	40,10	26,40	26,17
17	43,08	42,55	42,11	40,21	27,14	26,80
18	36,83	37,08	37,21	37,23	27,93	27,49
19	34,67	34,77	34,82	34,91	28,56	28,06
20	33,84	33,88	33,89	33,88	28,93	28,40
21	32,99	33,03	33,06	33,09	29,07	28,53
22	31,93	32,03	32,10	32,26	29,06	28,53
23	30,98	31,11	31,19	31,44	28,96	28,45

Para o CASO 3, a partir dos dados de $\gamma=0.95$ (cerâmica escura) e temperatura interna $U_i=18^{\circ}C$, obtemos os transientes térmicos nas interfaces das cinco camadas da parede equivalente que representa o sistema de revestimento cerâmico de uma fachada, conforme apresentados na Tabela A.14.

Tabela A.14 – Transientes Térmicos para o CASO 3.

CA	CASO 3: CERÂMICA ESCURA E TEMPERATURA INTERNA 18°C					
Hora	t _{ext}	T _{C/AC}	T _{AC/E}	T _{E/S}	T _{S/R}	T_{int}
0	28,59	28,85	29,04	29,61	25,80	24,81
1	26,26	26,19	26,14	25,85	21,52	21,06
2	25,43	25,43	25,42	25,31	21,52	21,06
3	25,52	25,30	25,37	25,12	21,49	21,03
4	25,26	25,20	25,16	24,95	21,43	20,99
5	24,29	24,34	24,36	24,39	21,37	20,93
6	23,83	23,86	23,87	23,89	21,29	20,86
7	24,11	24,04	24,00	23,84	21,19	20,78
8	24,42	24,32	24,25	23,98	21,07	20,68
9	24,56	24,46	24,38	24,08	20,97	20,59
10	25,88	25,60	25,40	24,72	20,89	20,52
11	27,65	27,24	26,92	25,88	20,85	20,48
12	28,96	28,52	28,20	27,00	20,87	20,49
13	35,19	34,01	33,18	30,39	20,96	20,56
14	46,81	44,58	42,98	37,60	21,18	20,74
15	55,04	52,69	50,97	44,78	21,70	21,17
16	58,51	56,52	55,01	49,32	22,63	21,95
17	53,44	52,62	51,93	48,78	23,91	23,04
18	39,90	40,70	41,18	41,97	25,27	24,23
19	35,41	35,81	36,08	36,85	26,28	25,14
20	33,89	34,08	34,23	34,64	26,76	25,60
21	32,71	32,86	32,96	33,25	26,78	25,64
22	31,47	31,63	31,74	32,05	26,55	25,45
23	30,40	30,56	30,66	30,98	26,20	25,15

Por fim, para o CASO 4, a partir dos dados de $\gamma=0.95$ (cerâmica escura) e temperatura interna $U_i=25^{\circ}C$, obtemos os transientes térmicos nas interfaces das cinco camadas da parede equivalente que representa o sistema de revestimento cerâmico de uma fachada, conforme apresentado na Tabela A.15.

Tabela A.15 – Transientes Térmicos para o CASO 4.

	CASO 4: CERÂMICA ESCURA E TEMPERATURA INTERNA 25°C					
Hora	t _{ext}	T _{C/AC}	T _{AC/E}	T _{E/S}	T _{S/R}	T _{int}
0	29,62	29,99	30,25	31,13	30,43	29,75
1	27,29	27,33	27,35	27,37	26,15	26,00
2	26,47	26,57	26,63	26,83	26,14	25,99
3	26,55	26,57	26,58	26,64	26,11	25,97
4	26,29	26,34	26,37	26,70	26,06	25,92
5	25,32	25,47	25,57	25,91	26,00	25,87
6	24,86	24,99	25,08	25,41	25,92	25,80
7	25,14	25,18	25,21	25,36	25,81	25,71
8	25,46	25,46	25,46	25,50	25,70	25,62
9	25,59	25,59	25,59	25,60	25,60	25,53
10	26,91	26,74	26,61	26,24	25,52	25,45
11	28,69	28,37	28,15	27,40	25,48	25,41
12	30,00	29,66	29,41	28,52	25,50	25,43
13	36,21	35,14	34,39	31,91	25,59	25,50
14	47,85	45,71	44,19	39,12	25,81	25,68
15	56,07	53,83	52,19	46,30	26,33	26,11
16	59,55	57,65	56,22	50,84	27,26	26,88
17	54,47	53,75	53,14	50,30	28,53	27,98
18	40,93	41,84	42,39	43,49	29,89	29,16
19	36,44	36,94	37,29	38,37	30,90	30,07
20	34,92	35,23	35,44	36,16	31,38	30,53
21	33,74	33,99	34,17	34,77	31,41	30,58
22	32,50	32,76	32,95	33,57	31,18	30,39
23	31,44	31,69	31,87	32,50	30,83	30,09

CÁLCULO DA FACHADA EQUIVALENTE

Consideramos como fachada equivalente as duas regiões de 5,0cm de extensão de cada lado, representadas na Figura 4.19. Essas duas regiões devem ter um comportamento equivalente ao restante da fachada que estão representando no modelo, em termos de rigidez, esforços e deformações. Como a área correspondente aos eixos x e y é de apenas 5,0cm de extensão, mas a espessura do modelo continua a mesma, ou seja, 3,15 cm; devemos definir propriedades diferentes para estas duas direções (x e y) perpendiculares entre si. Assim, as propriedades dos materiais das camadas de emboço, argamassa colante, peças cerâmicas e rejunte terão valores diferenciados segundo as direções x e y. As propriedades na direção x não sofrem alteração, pois a espessura das regiões que representam a fachada equivalente não se altera. Já as propriedades do eixo y devem ser calculadas de forma a representar o restante da extensão da fachada na direção x. Assim, descrevemos abaixo, o cálculo do módulo de elasticidade e do coeficiente de dilatação térmica equivalentes de cada elemento que compõe o revestimento externo da fachada.

Módulo de Elasticidade Equivalente

Para o cálculo do módulo de elasticidade equivalente do emboço e da argamassa colante, utiliza-se a Lei de *Hooke*, representada pela Equação A.133.

$$\sigma = \varepsilon.E$$
, sendo $\varepsilon = \Delta L/L_0$ (A.133)

Onde $\sigma=$ Tensão; $\varepsilon=$ Deformação; E= Módulo de Elasticidade; $\Delta L=$ Variação de comprimento que o restante da fachada está submetido ao ser solicitado; e $L_o=$ Comprimento inicial da fachada. Assim, podemos escrever a Equação A.134:

$$\sigma = E\Delta L/L_0 \tag{A.134}$$

Considerando que, as tensões e os deslocamentos da fachada equivalente devem ser os mesmos da fachada real, podemos escrever que $\sigma_F = \sigma_{Eq}$ e, consequentemente, usando a Equação A.134, obtemos para a fachada real e para a fachada equivalente:

$$E_{F}(\Delta L/L_{F}) = E_{Eq}(\Delta L/L_{Eq})$$
(A.135)

Onde σ_F = Tensão da fachada real; σ_{Eq} = Tensão da fachada equivalente; E_F = Módulo de elasticidade da fachada real; E_{Eq} = Módulo de elasticidade da fachada equivalente; L_F = Comprimento do restante da fachada; e L_{Eq} = Comprimento da fachada equivalente. Eliminando ΔL na Equação A.135, obtemos:

$$E_{Eq} = E_F \left(L_{Eq} / L_F \right) \tag{A.136}$$

Sendo $L_F=490,0-29,5=460,5$ cm é o comprimento do restante da fachada e usando os valores definidos sendo $E_{\rm Emboço}=5499,0$ de $E_{\rm Arg.colante}=3562,0$ de para o emboço e para a argamassa colante:

$$E_{\text{Eq/emboco}} = 119,41 \text{MPa}$$
 e $E_{\text{Eq/Arg.colante}} = 77,35 \text{MPa}$

Para o cálculo do módulo de elasticidade equivalente da cerâmica e rejunte (juntos), da Equação A.134, obtém-se:

$$\Delta L = \sigma L_0 / E \tag{A.137}$$

O deslocamento (dilatação) de toda a fachada na camada de cerâmica mais rejunte pode ser escrito como a soma:

$$\Delta l = \Delta L_{\text{Rejunte}} + \Delta L_{\text{Cerâmica}} \tag{A.138}$$

O comprimento inicial desta camada também é dado pela soma dos comprimentos do rejunte mais o da cerâmica:

$$L_{o} = L_{0/\text{Rejunte}} + L_{0/\text{Cerâmica}} \tag{A.139}$$

Da Equação A.136, para o módulo de elasticidade $E_{\text{Re junte}+\text{Cerâmico}}$ equivalente da camada "cerâmica mais rejunte" para o comprimento $L_o = L_{0/\text{Re junte}} + L_{0/\text{Cerâmica}}$, podemos escrever:

$$\Delta L = \frac{\sigma \left(L_{0/\text{Rejunte}} + L_{0/\text{Cerâmico}} \right)}{E_{\text{Rejunte} + \text{Cerâmico}}}$$
(A.140)

Da Equação A.138 em conjunto com a Equação A.137, para cada material isoladamente, temos que:

$$\Delta L = \frac{\sigma L_{0/\text{Rejunte}}}{E_{\text{Rejunte}}} + \frac{\sigma L_{0/\text{Cerâmico}}}{E_{\text{Cerâmico}}}$$
(A.141)

Igualando as Equações A.140 e A.141, eliminando σ , obtém-se:

$$\frac{L}{E_{\text{Rejunte}+\text{Cerâmico}}} = \frac{L_{0/\text{Rejunte}}}{E_{\text{Rejunte}} \left(L_{0/\text{Rejunte}} + L_{0/\text{Cerâmica}} \right)} + \frac{L_{0/\text{Cerâmica}}}{E_{\text{Cerâmica}} \left(L_{0/\text{Cerâmica}} + L_{0/\text{Rejunte}} \right)} \tag{A.142}$$

Portanto, o módulo de elasticidade equivalente para a "cerâmica mais o rejunte" pode ser calculado pela fórmula dada na Equação A.143:

$$E_{\text{Rejunte}+\text{Cerâmico}} = \frac{E_{\text{Rejunte}} E_{\text{Cerâmico}} \left(L_{0/\text{Rejunte}} + L_{0/\text{Cerâmica}} \right)}{L_{0/\text{Rejunte}} E_{\text{Cerâmico}} + L_{0/\text{Cerâmico}} E_{\text{Rejunte}}}$$
(A.143)

Na Equação A.143, usando $L_{o/Rejunte}=2x0,50=1,00cm$; $L_{o/Cerâmico}=3x9,50=28,50cm$ e com $E_{Cerâmico}=41600,00MP$ a e $E_{Rejunte}=7879,00MP$ a , retirados da Figura 4.19, encontramos:

$$E_{\text{Rejunte+Cerâmico}} = 36.329,34 \text{M Pa}$$

Para acharmos o módulo de elasticidade equivalente para as condições de contorno relativas às duas faixas de 5cm como mostrado na Figura 4.19, partimos do princípio que as tensões na faixa são iguais a tensão na camada completa de cerâmica mais rejunte. Isto é, $\sigma_F = \sigma_{Eq}$.

Portanto, da Equação A.135, temos:

$$E_{F} \frac{\Delta L}{L_{F}} = E_{\text{Eq/Rejunte+Cerâmica}} \frac{\Delta L}{L_{\text{Eq/Rejunte+Cerâmica}}}$$
(A.144)

Logo:

$$E_{\text{Eq/Rejunte}+\text{Cerâmica}} = E_F \frac{L_{\text{Eq/rejunte}+\text{Cerâmico}}}{L_F}$$
(A.145)

Portanto, se $E_F = E_{Rejunte+Cerâmico} = 36.329,34$ M Pa; $L_F = 490 - (3x9,5 + 2x0,5) = 460,50$ cm; e $L_{Eg/Rejunte+Cerâmico} = 5,0x2 = 10,0$ cm, obtemos da Equação A.145

$$E_{\text{Ea/Reiunte+Cerâmico}} = 788,91\text{MPa}$$

A Tabela A.16 apresenta os valores dos módulos de elasticidade equivalentes para a região de 5cm que representará, no modelo numérico.

Tabela A.16 – Módulo de Elasticidade Equivalente

Material	Módulo de Elasticidade Equivalente (GPa)
Emboço	0,11941
Argamassa Colante	0,07735
Rejunte + Cerâmica	0,78891

Coeficiente de Dilatação Térmica Equivalente

O cálculo do coeficiente de dilatação linear equivalente do emboço e da argamassa colante é obtido a partir da Equação A.146.

$$\Delta L = \alpha . L_0 . \Delta t \tag{A.146}$$

Onde ΔL = Variação do comprimento; α = Coeficiente de dilatação térmica linear; L_0 = Comprimento inicial; e ΔT = Variação da temperatura.

Considerando que os deslocamentos do modelo equivalente da fachada devem ser iguais ao da fachada real para a mesma variação de temperatura, temos: a Equação A.147:

$$\Delta L_{Eq} = \Delta L_{F} \tag{A.147}$$

Onde ΔL_{Eq} = Variação do comprimento da fachada equivalente; e ΔL_F = Variação do comprimento do restante da fachada. Substituindo a Equação A.146 em A.147:

$$\alpha_{Eq}.L_{Eq}.\Delta t = \alpha_{F}.L_{F}\Delta t \tag{A.148}$$

Portanto,

$$\alpha_{\rm Eq} = \alpha_{\rm F} \cdot \frac{L_{\rm F}}{L_{\rm Eq}} \tag{A.149}$$

Com os valores dos coeficientes de dilatação térmica da Tabela 4.18, $\alpha_{\text{Emboço}} = 11,5x10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e $\alpha_{\text{Arg.colante}} = 8,7x10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, e sabendo-se que $L_{\text{F}} = 490 - \left(3x9,5 + 2x0,5\right) = 460,50\text{cm}$ e $L_{\text{Eg/Rejunte}+\text{Cerâmico}} = 5,0x2 = 10,0\text{cm}$. Obtemos:

$$\alpha_{\rm Eq/Emboço} = 0{,}00053/\ ^{\rm o}C$$
 e $\alpha_{\rm Eq/Arg,colante} = 0{,}00040/\ ^{\rm o}C$

Para os cálculos do coeficiente de dilatação térmica linear equivalente da cerâmica e do rejunte foram feitas as seguintes considerações:

$$\Delta L = \Delta L_{\text{Cerâmico}} + \Delta L_{\text{Reiunte}}$$
 (A.150)

$$\Delta L = \left(L_{\text{Cerâmico}} + L_{\text{Rejunte}}\right) \alpha_{\text{Cerâmico+Rejunte}}.\Delta t \tag{A.151}$$

$$\Delta L = L_{\text{Cerâmico}} \alpha_{\text{Cerâmico}} \Delta t + L_{\text{Rejunte}} \alpha_{\text{Rejunte}} \Delta t \tag{A.152}$$

$$\alpha_{\text{Cerâmico+Rejunte}} = \frac{L_{\text{Cerâmico}} \alpha_{\text{Cerâmico}} + L_{\text{Rejunte}} \alpha_{\text{Rejunte}}}{L_{\text{Cerâmico}} + L_{\text{Rejunte}}}$$
(A.153)

e, com os valores da Tabela 4.6 das propriedades dos materiais, sendo: $\alpha_{Cerâmica}=6.8x10^{-6}/^{\circ}C\;; \qquad \alpha_{Rejunte}=4.2x10^{-6}/^{\circ}C\;; \qquad L_{Cerâmica}=3x9,50=28,50cm \qquad e$ $L_{Rejunte}=2x0,50=1,00cm\;.\;Obtemos:$

$$\alpha_{\text{Cerâmica+Rejunte}} = 6.71 \text{x} 10^{-6} / ^{\circ} \text{C}$$

Para o valor equivalente à região de 5cm na Figura 4.19, temos:

$$\alpha_{\text{Eq/Cerâmica+Rejunte}} = \alpha_{\text{Cerânica+Rejunte}} \frac{L_{\text{F}}}{L_{\text{Eq}}}$$
(A.154)

Resultando em:

$$\alpha_{\rm Eq/Cer\hat{a}mica+Rejunte} = 0,00031/\ ^{\rm o}C$$

A Tabela A.17 resume os valores calculados dos coeficientes de dilatação térmica linear equivalente para as regiões de 5cm, representadas para a fachada na Figura 4.19.

Tabela A.17 – Coeficiente de dilatação térmica linear equivalente

Material	Coeficiente de Dilatação Térmica Linear Equivalente
	(/°C)
Emboço	0,00053
Argamassa Colante	0,00040
Cerâmica + Rejunte	0,00031

APÊNDICE B

RESULTADOS DOS ENSAIOS ESTÁTICOS DAS ARGAMASSAS COLANTES ACII E ACIII

Os valores de resistência à tração na flexão, de resistência à compressão axial, do módulo de elasticidade e da consistência da pasta para as argamassas colantes ACII e ACIII estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas B.1, B.2, B.3 e B.4.

Tabela B.1 – Resistência à Tração na Flexão das ACII e ACIII.

ACII	kN/cm ²	ACIII	kN/cm ²
1	0,38	1	0,33
2	0,37	2	0,32
3	0,34	3	0,35
4	0,37	4	0,35
5	0,34	5	0,34
6	0,36	6	0,31
7	0,39	7	0,30
8	0,40	8	0,32
9	0,37	9	0,32
Média	0,37	Média	0,32

Tabela B.2 – Resistência à compressão axial das ACII e ACIII.

ACII	kN/cm ²	ACIII	kN/cm²
1	1,08	1	0,96
2	1,07	2	0,94
3	1,07	3	0,94
4	1,05	4	0,95
5	1,05	5	0,94
6	1,07	6	0,95
7	1,06	7	0,94
8	1,08	8	0,93
9	1,08	9	0,954
Média	1,07	Média	0,95

Tabela B.3 <u>– Módulo de Elasticidade das A</u>CII e ACIII.

ACII	GPa	ACIII	GPa
1	2,96	1	5,46
2	2,98	2	5,42
3	2,98	3	5,44
4	2,96	4	5,45
5	2,97	5	5,43
6	2,97	6	5,45
7	2,95	7	5,46
8	2,98	8	5,43
9	2,96	9	5,42
Média	2,97	Média	5,44

Tabela B.4 – Consistência da Pasta das ACII e ACIII.

ACII	cm	ACIII	cm
1	0,50	1	0,58
2	0,53	2	0,57
3	0,52	3	0,59
4	0,54	4	0,60
5	0,49	5	0,58
6	0,52	6	0,58
7	0.53	7	0.58
8	0,50	8	0,61
9	0.54	9	0.57
10	0,53	10	0,59
11	0,53	11	0,57
12	0,51	12	0,58
Média	0,52	Média	0,59