

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

**PROCEDIMENTO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL PARA
A AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE
SISTEMAS DE REVESTIMENTO**

ENGº JOÃO CARLOS BARLETA UCHÔA

ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA

CO-ORIENTADOR: ELTON BAUER

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

PUBLICAÇÃO: E.DM-002A/07

BRASÍLIA/DF, 20 DE ABRIL DE 2007

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROCEDIMENTO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL PARA
A AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE
SISTEMAS DE REVESTIMENTO**

JOÃO CARLOS BARLETA UCHÔA

**DISSERTAÇÃO 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 MESTRE EM ESTRUTURA E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

**Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (UnB)
(Orientador)**

**Prof. Elton Bauer, DSc (UnB)
(Co-orientador)**

**Prof. José Luis Vital de Brito, DSc (UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Fernando Avancini Tristão, DSc (UFES)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 20 DE ABRIL DE 2007

FICHA CATALOGRÁFICA

UCHÔA, JOÃO CARLOS BARLETA.

Procedimento Numérico e Experimental para a Avaliação da Resistência à Fadiga de Sistemas de Revestimento

[Distrito Federal] 2007.

xix, 159p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2007).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Sistema de revestimento cerâmico

2. Curva S-N para argamassa

3. Tensões na argamassa

4. Transiente térmico em fachadas

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

UCHÔA, J. C. B. (2007). Procedimento Numérico e Experimental para a Avaliação da Resistência à Fadiga de Sistemas de Revestimento. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM-002A/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: João Carlos Barleta Uchôa.

TÍTULO: Procedimento Numérico e Experimental para a Avaliação da Resistência à Fadiga de Sistemas de Revestimento.

GRAU: Mestre

ANO: 2007

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

João Carlos Barleta Uchôa
Rua 35 Norte, Lote 05, Apto 1.103, Águas Claras.
71.919-000 - Brasília – DF – Brasil.

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

AGRADECIMENTOS

Aos professores e orientadores Luciano Mendes Bezerra e Elton Bauer, 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 Turnes, minha esposa, pelo carinho, paciência, dedicação, incentivo, confiança e apoio fundamentais durante todo este trabalho.

Ao meu amigo Mauro e família, pelo apoio e acolhida dados na minha chegada em Brasília.

Aos amigos da república, Eider, Joel, Diego, Gregório e Juan, muito obrigado pela companhia e pela amizade.

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

Aos amigos do Departamento de Estruturas: Alexon, Elisandra, Helder, Paulo, André, Fábio, Aline, Líris, Regis, Luis, Otávio, Gustavo, Maurício, Carlos, Selênio, Fernanda, Paula, Soraia, Cláudio, Carla e Thomaz, obrigado pelo companheirismo, carinho e amizade. Que esses sentimentos continuem para sempre.

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

Aos professores do PECC, pela amizade e conhecimentos transmitidos.

Ao secretário do PECC, Pedro, pela amizade e companheirismo.

Ao professor Alex e ao aluno Marcos, do Departamento de Engenharia Mecânica, pelo apoio dado durante o ensaio de fadiga.

Aos laboratoristas Severino e Xavier, muito obrigado pela ajuda dada nos ensaios de laboratório.

Ao CEFET-RR e CNPq, pelo apoio financeiro.

Ao CEFET-RR, por acreditar na importância da pesquisa científica e por incentivar estudos dessa natureza.

Ao diretor, professores e funcionários do CEFET-RR pelo apoio, amizade e companheirismo.

RESUMO

Autor: João Carlos Barleta Uchôa

Orientador: Luciano Mendes Bezerra

Co-orientador: Elton Bauer

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 2007

Os revestimentos em argamassa ou em cerâmica, geralmente, são empregados na parte externa (fachada) das edificações. Esses materiais propiciam isolamento acústico e térmico e a estanqueidade necessários para um razoável conforto nas edificações. Os revestimentos são executados em camadas compondo-se de: emboço, argamassa e, ainda, no caso de revestimentos em cerâmica, a argamassa colante e rejunte. Os revestimentos estão sujeitos às diferentes intempéries que se traduzem em ações solicitantes. Dessas ações solicitantes destacamos a variação da temperatura ao longo do dia e eventuais choques térmicos causados por chuvas e ventos. Tais ações, combinadas com as diferentes características físicas e mecânicas dos materiais empregados nos revestimentos, produzem estados de tensões e deformações nas fachadas que, ainda, são poucos conhecidos e, raramente, pesquisados. As variações de temperatura nos revestimentos podem gerar sérias patologias, como por exemplo, o deslocamento de peças que, conseqüentemente, podem ocasionar acidentes em transeuntes. Este trabalho apresenta uma metodologia para avaliação da resistência à fadiga de sistemas de revestimento, usando-se análise experimental e numérica via Elementos Finitos e, considerando o sistema de revestimento sob a ação cíclica da temperatura ambiente característica da cidade de Brasília. Esta pesquisa estuda, em particular, a influência das tensões termomecânicas na ruptura por fadiga da argamassa de revestimento. De forma original, obtém-se experimentalmente a curva “S-N” (tensão alternada versos número de ciclos) para a argamassa de emboço. A resistência à fadiga da argamassa sob tração é determinada como sendo de 0.64MPa. Com modelos apropriados para matérias frágeis, infere-se também a resistência à fadiga da argamassa sob compressão e sob tração-compressão. Com os valores de tensão alternada obtidos via análise numérica, é possível, com a metodologia apresentada, avaliar a resistência à fadiga da argamassa de emboço em sistema de revestimento cerâmico de fachadas.

ABSTRACT

Author: João Carlos Barleta Uchôa

Advisor: Luciano Mendes Bezerra

Co-advisor: Elton Bauer

Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, 2007

Coatings made of plain mortar or with ceramic tiles are usually employed on facades or external part of buildings. They provide the appropriate acoustic and thermal isolation and the necessary watertightness for a reasonable comfort inside the construction, and are, generally, arranged in layers of rendering, mortar, dry-set mortar, and ceramic tile grout, in the case of facades with ceramic tiles. Building coatings are also exposed to hazardous weather conditions or critical external actions like the everyday variation of temperature and eventually thermal shocks generated by rain falls and wind gusts. Those actions, in conjunction to the different physical and mechanical properties of the coating materials, produce stress and strain states not yet understood, not often studied, and scarce in the literature. The temperature transient on the coatings can generate serious pathologies like the unsticking of tiles or coating pieces in general that eventually may fall over pedestrians. This research presents a methodology for the evaluation of the fatigue resistance of facades. The methodology uses experimental investigation and numerical analysis with Finite Elements, and considers the coating system under the cyclic action of the environment temperature of Brasilia. In particular, this research studies the influence of the thermal stresses in the rupture of mortar coating due to thermal fatigue. The “S-N” curve (alternating stress vs. number of cycles) is experimentally obtained for the mortar material. The fatigue resistance of the mortar material under traction is determined as 0,64MPa. In addition, with appropriate mathematical models for fragile materials, the fatigue resistance of mortar under compression and traction-compression is also inferred. With the values of the alternating stress from the numerical analysis; it is possible, with the present methodology evaluate the mortar fatigue resistance in ceramic coating facades.

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 – MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	4
1.3 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	5
2 - REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS.....	7
2.1 – INTRODUÇÃO.....	7
2.2 – PESQUISAS SOBRE AS TENSÕES NO REVESTIMENTO CERÂMICO.....	8
2.3 – PESQUISAS EM FADIGA NO SISTEMA DE REVESTIMENTO.....	10
3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	12
3.1 – INTRODUÇÃO.....	12
3.2 – SISTEMA DE REVESTIMENTO E SUAS PATOLOGIAS.....	13
3.2.1 – Funções, Propriedades e Patologias do Sistema de Revestimento.....	14
3.2.3 – Tensões no Revestimento Cerâmico que Influenciam na Patologia.....	15
3.2.4 – Efeito Térmico no Revestimento Cerâmico que Influencia na Patologia.....	20
3.3 – TROCA DE CALOR EM FACHADAS.....	24
3.4 – FADIGA NO SISTEMA DE REVESTIMENTO.....	29
3.4.1 – Mecânica da Fratura e a Fratura por Fadiga.....	30
3.4.2 – Caracterização Prática da Fadiga – Curva S-N.....	33
3.4.3 – Teoria de Acumulação de Danos.....	36
3.4.4 – Fadiga em Sistemas de Revestimento.....	37
4 – ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	41
4.1 – INTRODUÇÃO.....	41
4.2 – ENSAIOS ESTÁTICOS NA ARGAMASSA.....	41
4.2.1 – Propriedade e característica da argamassa.....	42
4.2.2 – Determinação do Teor de Ar Incorporado.....	43
4.2.3 – Resistência à Deformação da Argamassa.....	44
4.2.4 – Determinação da Resistência à Tração na Flexão.....	45
4.2.5 – Determinação da Resistência à Compressão.....	47
4.2.6 – Determinação do Módulo de Deformação.....	48
4.3 – ENSAIOS DA ARGAMASSA À FADIGA.....	50
4.3.1 – O Ensaio à Fadiga e o Equipamento usado.....	50

4.3.2 – Dimensionamento do Corpo-de-Prova	51
4.4 – CURVAS DE WÖHLER PARA A ARGAMASSA	57
5 – ANÁLISE NUMÉRICA	63
5.1 – INTRODUÇÃO	63
5.2 – CONCEPÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	64
5.2.1 – Propriedades dos Materiais no Modelo Numérico	66
5.2.2 – Condição de Contorno Adotada	67
5.2.3 - Cálculo da Fachada Equivalente	68
5.2.3.1 – Módulo de Elasticidade Equivalente	68
5.2.3.2 – Coeficiente de Dilatação Térmica Equivalente	72
5.3 – O TRANSIENTE TÉRMICO ADOTADO	74
5.4 – O MODELO EM ELEMENTOS FINITOS	78
6 – ANÁLISES TÉRMICA, DE TENSÃO E DE FADIGA	81
6.1 – INTRODUÇÃO	81
6.2 – ANÁLISES TÉRMICAS	83
6.3 – ANÁLISES DE TENSÃO	87
6.3.1 – Caso-1	87
6.3.1.1 - Análise da Tensão Normal S_x	87
6.3.1.2 - Análise da Tensão Normal S_y	89
6.3.1.3 - Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}	90
6.3.1.4 - Análise da Tensão S_1	91
6.3.1.5 - Análise da Tensão S_2	93
6.3.1.6 – Deformada e Concentração de Tensão	94
6.3.1.7 - Análise da Fadiga	95
6.3.2 – Caso 2	96
6.3.2.1 - Análise da Tensão Normal S_x	96
6.3.2.2 - Análise das tensões Normal S_y	97
6.3.2.3 - Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}	99
6.3.2.4 - Análise da Tensão S_1	101
6.3.2.5 - Análise da Tensão S_2	102
6.3.2.6 – Deformada e Concentração de Tensão	103
6.3.2.7 - Análise da Fadiga	104
6.3.3 – Caso 3	105

6.3.3.1 - Análise da Tensão Normal S_x	105
6.3.3.2 - Análise da Tensão Normal S_y	107
6.3.3.3 - Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}	108
6.3.3.4 - Análise da Tensão S_1	109
6.3.3.5 - Análise da Tensão S_2	111
6.3.3.6 – Deformada e Concentração de Tensão	112
6.3.3.7 - Análise da Fadiga	113
6.3.4 – Caso 4.	113
6.3.4.1 - Análise da Tensão Normal S_x	113
6.3.4.2 - Análise da Tensão Normal S_y	115
6.3.4.3 - Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}	117
6.3.4.4 - Análise da Tensão S_1	118
6.3.4.5 - Análise da Tensão S_2	119
6.3.4.6 – Deformada e Concentração de Tensão	121
6.3.4.7 - Análise da Fadiga	122
7 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	123
7.1- ANÁLISE EXPERIMENTAL	123
7.2 – ANÁLISE NUMÉRICA.....	125
7.3 – TRABALHOS FUTUROS	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129
APÊNDICE A.....	135
APÊNDICE B	145
APÊNDICE C	149

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Solicitações impostas às superfícies externas da edificação	1
Figura 1.2 - Deslocamento de revestimento cerâmico em fachadas	2
Figura 3.1 - Estrutura de sistema de revestimento (Junginger, 2003)	14
Figura 3.2 - (a) Sistema à temperatura ambiente (T); (b) Cerâmicas sob tensão de tração e cisalhamento ($T_1 > T$) e (c) peças soltas devido à tensão de compressão ($T_2 < T$) (Fiorito, 1994)	17
Figura 3.3 - Colapso do sistema de revestimento (Fiorito, 1994)	18
Figura 3.4 - Barra sujeita a um efeito térmico	20
Figura 3.5 - Esforços causados pela temperatura no revestimento	22
Figura 3.6 - Troca de calor através de paredes segundo Frota e Schiffer (2003)	25
Figura 3.7 - Demonstração da leitura de temperatura nas interfaces do revestimento	27
Figura 3.8 - Processo de fadiga	29
Figura 3.9 - Modos de carregamento básico de uma fissura	31
Figura 3.10 - Abertura de fissura sob tensão uniforme	31
Figura 3.11 - Distribuição teórica das tensões na ponta da trinca	32
Figura 3.12 - Propagação de uma trinca ou fissura por deslizamento plástico	33
Figura 3.13 - Carregamento Senoidal	34
Figura 3.14 - Curva S-N ou curva de Wöhler para avaliação do ciclo de vida	35
Figura 3.15 - (a) Curva de Von-Mises para materiais dúcteis, (b) Curva de Coulomb-Mohr para materiais frágeis	38
Figura 3.16 - Curvas de resistência para material frágil durante os ciclos de carga	39
Figura 3.17 – Curvas S-N adotadas para argamassa	40
Figura 4.1 – Argamassa utilizada	42
Figura 4.2 – (a) Aparelho SOLOTEST. (b) Injeção de água. (c) Obtenção da pressão do ensaio e (d) Leitura do teor de ar incorporado	43
Figura 4.3 – Detalhes do equipamento para o ensaio de penetração do cone	45
Figura 4.4 - (a) Prensa manual (b) Detalhe do ensaio de tração à flexão	46
Figura 4.5 – Esquema de carga para determinação da resistência à tração na flexão	47
Figura 4.6 – (a) CP rompido à Flexão. (b) Ensaio à compressão	48
Figura 4.7 – (a) CP para determinação do módulo de deformação (b) Posicionamento na prensa. (c) Leitura da deformação do corpo-de-prova	49

Figura 4.8 – Diagrama tensão vs. deformação, típico de ensaio de um CP para a determinação do módulo de deformação da argamassa	49
Figura 4.9 – Equipamento MTS 810 usado no ensaio de fadiga	52
Figura 4.10 – Descrição do equipamento MTS-810 (<i>Material Test System</i>)	52
Figura 4.11 – Tensões locais em três casos de entalhe	53
Figura 4.12 – Corpos-de-prova em (a) e (b) com ruptura precoce devido à excentricidade	53
Figura 4.13 - (a) Corpo-de-Prova (b) Mecanismo de fixação na garra do MTS 810	54
Figura 4.14 – Fator de concentração de tensão de uma barra retangular sob tração	55
Figura 4.15 – (a) Molde em aço do P. (b) Moldagem do CP. (c) CP de argamassa	56
Figura 4.16 – (a) Atuador e garra. Antes (b) e depois (c) da ruptura por fadiga	56
Figura 4.17 – Curvas S-N de fadiga da argamassa de emboço	59
Figura 4.18 – Curvas S-N de fadiga linearizadas para a argamassa de emboço	60
Figura 4.19 – Curvas de ruptura para avaliação da fadiga	61
Figura 5.1 – Hipótese simplificadora de estado plano	64
Figura 5.2 – Dimensões típicas e adotadas no modelo do sistema de revestimento	65
Figura 5.3 – Geometria dos elementos PLANE42 e PLANE55 do ANSYS	65
Figura 5.4 – Modelo com fachada equivalente de 5 cm em cada lado	68
Figura 5.5 - Leitura da temperatura nas interfaces do revestimento cerâmico	76
Figura 5.6 – Transiente-1: variação da temperatura na superfície externa do sistema de revestimento com cerâmica clara e com 18°C de temperatura interna	77
Figura 5.7 – Transiente-2: variação da temperatura na superfície externa do sistema de revestimento com cerâmica clara e com 25°C de temperatura interna	77
Figura 5.8 – Transiente-3: variação da temperatura na superfície externa do sistema de revestimento com cerâmica escura e com 18°C de temperatura interna	78
Figura 5.9 – Transiente-4: variação da temperatura na superfície externa do sistema de revestimento com cerâmica escura e com 25°C de temperatura interna	78
Figura 5.10 – Modelo numérico em elementos finitos	79
Figura 5.11 – Detalhes do modelo em elementos finitos (a) na fachada equivalente (b) na região do emboço, da argamassa colante, rejunte e cerâmica	79
Figura 5.12 – Condição de contorno para análise térmica no ANSYS	80
Figura 5.13 – Condição de contorno para análise termomecânica no ANSYS	80
Figura 6.1 – Área em destaque que será estudada	82

Figura 6.2 – Detalhe da (a) região e (b) dos nós de interesse	82
Figura 6.3 – CASO-1: Distribuição crítica de temperatura no sistema de revestimento para cerâmica clara e transiente 1: máxima temperatura 51,9°C	83
Figura 6.4 – CASO-2: Distribuição crítica de temperatura no sistema de revestimento para cerâmica clara e transiente 2: máxima temperatura 47,06°C	84
Figura 6.5 – CASO-3: Distribuição crítica de temperatura no sistema de revestimento para cerâmica escura e transiente 3: máxima temperatura 71,12°C	84
Figura 6.6 – CASO-4: Distribuição crítica de temperatura no sistema de revestimento para cerâmica escura e transiente 4: máxima temperatura 69,09°C	85
Figura 6.7 – CASOS 1 e 2: Transiente térmico na seção A-A' do sistema de revestimento para cerâmicas claras – valores nodais	85
Figura 6.8 – CASOS 3 e 4: Transiente térmico na seção A-A' do sistema de revestimento para cerâmicas escuras – valores nodais	86
Figura 6.9 – CASOS 1 e 2: Diferença de temperatura na seção A-A' do sistema de revestimento para cerâmicas claras – valores nodais	86
Figura 6.10 – CASOS 3 e 4: Diferença de temperatura na seção A-A' do sistema de revestimento para cerâmicas escuras – valores nodais	86
Figura 6.11 – Caso 1: Tensões S_x	87
Figura 6.12 – Caso 1: Tensões S_x às 7h, 16h e 18h	88
Figura 6.13 – Caso 1: Tensões S_y	89
Figura 6.14 – Caso 1: Tensões S_y às 7h, 16h e 18h	90
Figura 6.15 – Caso 1: Tensões S_{xy}	91
Figura 6.16 – Caso 1: Tensões S_{xy} às 7h, 16h e 18h	91
Figura 6.17 - Caso 1: Tensões S_1	92
Figura 6.18 – Caso 1: Tensões S_1 às 7h, 16h e 18h	92
Figura 6.19 - Caso 1: Tensões S_2	93
Figura 6.20 – Caso 1: Tensões S_2 às 7h, 16h e 18h	94
Figura 6.21 – Caso 1: Deformações - cerâmica clara - 16h	94
Figura 6.22 – Caso 1: Tensão (kgf/cm ²) de Von-Mises - cerâmica clara - 16h	95
Figura 6.23 – Caso 2: Tensões S_x	96
Figura 6.24 – Caso 2: Tensões S_x às 8h, 16h e 18h do dia	97
Figura 6.25 – Caso 2: Tensões S_y	98
Figura 6.26 – Caso 2: Tensões S_y as 8h, 16h e 18h	99

Figura 6.27 – Caso 2: Tensões S_{xy}	99
Figura 6.28 – Caso 2: Tensões S_{xy} as 8h, 16h e 18h	100
Figura 6.29 – Caso 2: Tensões S_1	101
Figura 6.30 – Caso 2: Tensões S_1 as 8h, 16h e 18h	102
Figura 6.31 – Caso 2: Tensões S_2	103
Figura 6.32 – Caso 2: Tensões S_2 as 8h, 16h e 18h	103
Figura 6.33 – Caso 2: Deformações - cerâmica clara - 16h	104
Figura 6.34 – Caso 1: Tensão (kgf/cm^2) de Von-Mises - cerâmica clara - 16h	104
Figura 6.35 – Caso 3: Tensões S_x	105
Figura 6.36 – Caso 3: Tensões S_x as 7h, 16h e 18h	106
Figura 6.37 – Caso 3: Tensões S_y	107
Figura 6.38 – Caso 3: Tensões S_y as 7h, 16h e 18h	108
Figura 6.39 – Caso 3: Tensões S_{xy}	108
Figura 6.40 – Caso 3: Tensões S_{xy} as 7h, 16h e 18h	109
Figura 6.41 – Caso 3: Tensões S_1	110
Figura 6.42 – Caso 3: Tensões S_1 as 7h, 16h e 18h	110
Figura 6.43 – Caso 3: Tensões S_2	111
Figura 6.44 – Caso 3: Tensões S_2 as 7h, 16h e 18h	111
Figura 6.45 – Caso 3: Deformações - cerâmica clara - 16h	112
Figura 6.46 – Caso 3: Tensão (kgf/cm^2) de Von-Mises - cerâmica clara - 16h	112
Figura 6.47 – Caso 4: Tensões S_x	114
Figura 6.48 – Caso 4: Tensões S_x as 7h, 16h e 18h	115
Figura 6.49 – Caso 4: Tensões S_y	115
Figura 6.50 – Caso 4: Tensões S_y as 7h, 16h e 18h	116
Figura 6.51 – Caso 4: Tensões S_{xy}	117
Figura 6.52 – Caso 4: Tensões S_{xy} as 7h, 16h e 18h	118
Figura 6.53 – Caso 4: Tensões S_1	119
Figura 6.54 – Caso 4: Tensões S_1 as 7h, 16h e 18h	119
Figura 6.55 – Caso 4: Tensões S_2	120
Figura 6.56 – Caso 4: Tensões S_2 as 7h, 16h e 18h	120
Figura 6.57 – Caso 4: Deformações - cerâmica clara - 16h	121
Figura 6.58 – Caso 4: Tensão (kgf/cm^2) de Von-Mises - cerâmica clara - 16h	121
Figura 7.1 – Efeito da tração na região das camadas de rejunte (junta) no sistema	127

de revestimento cerâmico.

Figura A.1 – Demonstração da leitura de temperatura nas interfaces do revestimento

138

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Porcentagem de ar incorporado na argamassa	44
Tabela 4.2 – Consistência da argamassa	45
Tabela 4.3 – Resistência da argamassa à tração na Flexão	47
Tabela 4.4 – Resistência à compressão	48
Tabela 4.5 – Ensaio do módulo de deformação da argamassa de emboço	50
Tabela 4.6 – Resumo dos cálculos para o CP de argamassa para ensaio à fadiga	55
Tabela 4.7 – Ensaio de fadiga da argamassa de emboço	58
Tabela 4.8 – Pontos do ensaio de fadiga da argamassa sob tração e sob compressão	59
Tabela 5.1 – Propriedades requeridas do elemento PLANE55	66
Tabela 5.2 – Propriedades requeridas do elemento PLANE42	66
Tabela 5.3 – Propriedades atribuídas ao elemento PLANE55	67
Tabela 5.4 – Propriedades atribuídas ao elemento PLANE42	67
Tabela 5.5 – Módulo de Elasticidade Equivalente	72
Tabela 5.6 – Coeficiente de dilatação térmica linear equivalente	74
Tabela 5.7 – Transiente de Temperatura de Brasília em 1963	75
Tabela 6.1 – Casos para análise	81
Tabela 6.2 – Caso 1: Tensões S_x nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	88
Tabela 6.3 – Caso 1: Tensões S_y nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	89
Tabela 6.4 – Caso 1: Tensões S_{xy} nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	90
Tabela 6.5 – Caso 1: Tensões S_1 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	92
Tabela 6.6 – Caso 1: Tensões S_2 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	93
Tabela 6.7 - Caso-1: Tensões (MPa) para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço	95
Tabela 6.8 – Caso 2: Tensões S_x nos nós do modelo para as 8h, 16h e 18h	96
Tabela 6.9 – Caso 2: Tensões S_y nos nós do modelo para as 8h, 16h e 18h	98
Tabela 6.10 – Caso 2: Tensões S_{xy} nos nós do modelo para as 8h, 16h e 18h	100
Tabela 6.11 – Caso 2: Tensões S_1 nos nós do modelo para as 8h, 16h e 18h	101
Tabela 6.12 – Caso 2: Tensões S_2 nos nós do modelo para as 8h, 16h e 18h	102
Tabela 6.13 - Caso-2: Tensões (MPa) para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço	105
Tabela 6.14 – Caso 3: Tensões S_x nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	106
Tabela 6.15 – Caso 3: Tensões S_y nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	107

Tabela 6.16 - Caso 3: Tensões S_{xy} nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	109
Tabela 6.17 - Caso 3: Tensões S_1 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	110
Tabela 6.18 - Caso 3: Tensões S_2 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	111
Tabela 6.19 - Caso-3: Tensões (MPa) para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço	113
Tabela 6.20 – Caso 4: Tensões S_x nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	114
Tabela 6.21 – Caso 4: Tensões S_y nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	116
Tabela 6.22 - Caso 4: Tensões S_{xy} nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	117
Tabela 6.23 - Caso 4: Tensões S_1 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	118
Tabela 6.24 - Caso 4: Tensões S_2 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h	119
Tabela 6.25 - Caso-4: Tensões (MPa) para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço	122
Tabela A.1 – Valores de radiação solar incidente (I_g)	135
Tabela A.2 - Coeficiente de absorção térmica	136
Tabela A.3 – Variação da condutância térmica superficial externa (h_e)	136
Tabela A.4 – Valores da temperatura superficial externa do sistema de revestimento para cerâmica clara e escura	137
Tabela A.5 – Coeficiente de condutibilidade térmica	138
Tabela A.6 – Transiente-2: Valor das temperaturas nas interfaces para cerâmica clara	140
Tabela A.7 – Transiente-4: Valor das temperaturas nas interfaces para cerâmica escura	142
Tabela A.8 – Transiente-1: Valor das temperaturas nas interfaces para cerâmica clara	143
Tabela A.9 – Transiente-3: Valor das temperaturas nas interfaces para cerâmica escura	143
Tabela B.1 – Caso 1: Valor das temperaturas nas camadas da seção A-A' para cerâmica clara e temperatura interna de 18°C	145
Tabela B.2 – Caso 2: Valor das temperaturas nas camadas da seção A-A' para cerâmica clara e temperatura interna de 25°C	146
Tabela B.3 – Caso 3: Valor das temperaturas nas camadas da seção A-A' para cerâmica escura e temperatura interna de 18°C	147
Tabela B.4 – Caso 4: Valor das temperaturas nas camadas da seção A-A' para	

cerâmica escura e temperatura interna de 25°C	149
Tabela C.1 – Caso 1: Tensão S_x	149
Tabela C.2 – Caso 1: Tensão S_y	150
Tabela C.3 – Caso 1: Tensão de cisalhamento S_{xy}	150
Tabela C.4 – Caso 1: Tensão S_1	151
Tabela C.5 – Caso 1: Tensão S_2	151
Tabela C.6 – Caso 2: Tensão S_x	152
Tabela C.7 – Caso 2: Tensão S_y	152
Tabela C.8 – Caso 2: Tensão de cisalhamento S_{xy}	153
Tabela C.9 – Caso 2: Tensão S_1	153
Tabela C.10 – Caso 2: Tensão S_2	154
Tabela C.11 – Caso 3: Tensão S_x	154
Tabela C.12 – Caso 3: Tensão S_y	155
Tabela C.13 – Caso 3: Tensão de cisalhamento S_{xy}	155
Tabela C.14 – Caso 3: Tensão S_1	156
Tabela C.15 – Caso 3: Tensão S_2	156
Tabela C.16 – Caso 4: Tensão S_x	157
Tabela C.17 – Caso 4: Tensão S_y	157
Tabela C.18 – Caso 4: Tensão de cisalhamento S_{xy}	158
Tabela C.19 – Caso 4: Tensão S_1	158
Tabela C.20 – Caso 4: Tensão S_2	159

1 - INTRODUÇÃO

1.1 – APRESENTAÇÃO

O sistema de revestimento cerâmico para fachadas de prédios vem alcançando grande escala de utilização, em virtude de algumas características apresentadas por esse tipo de revestimento. Entre elas, podemos destacar o conforto acústico e térmico, a estanqueidade, a estabilidade, a durabilidade, a baixa manutenção e a valorização do imóvel. Apesar de todas essas características positivas, o sistema de revestimento cerâmico em fachadas pode apresentar sérios danos de descolamento e deslocamento causado por variações de tensões as quais as fachadas estão submetidas. Esta variação de tensão advém, sobretudo, de intempéries, tais como a variação de temperatura em função do aquecimento da fachada durante o dia e o resfriamento da mesma durante a noite, além de chuvas e rajadas de vento ocasionais, entre outras intempéries, conforme ilustrado na Figura 1.1.

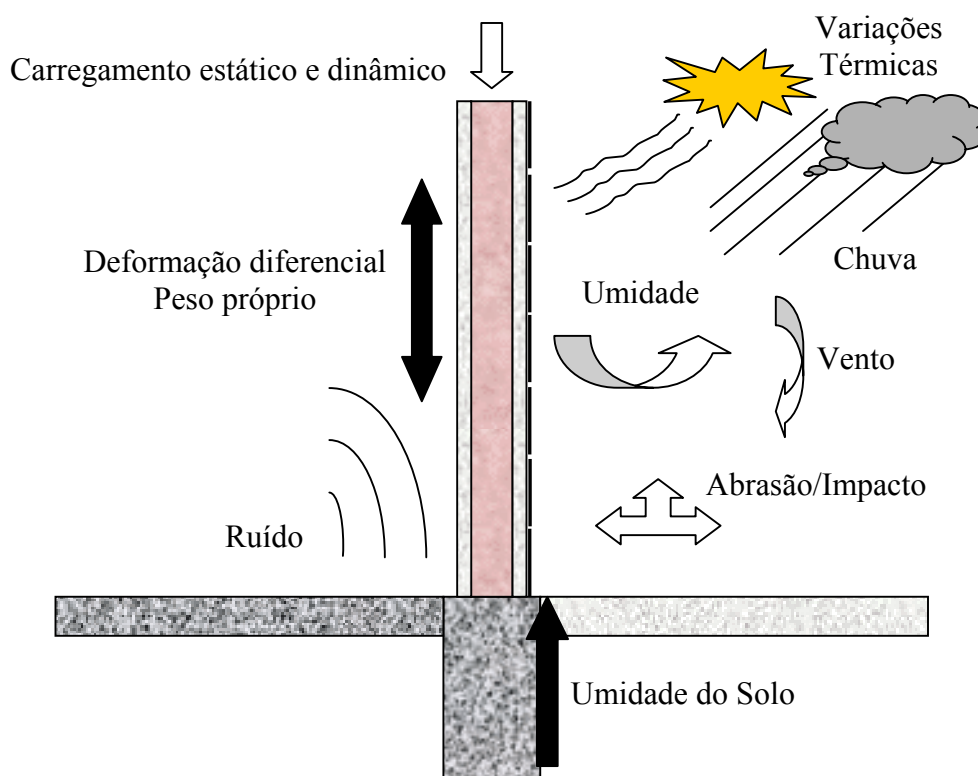


Figura 1.1 - Solicitações impostas às superfícies externas da edificação

Embora, os problemas com o revestimento cerâmico possam ser variados, desde simples eflorescências passageiras até o completo deslocamento 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, quando adicionados, culminam com o surgimento de manifestações patológicas. Observa-se ainda que, a qualidade e a durabilidade dos revestimentos cerâmicos estão também fortemente ligadas ao planejamento e a escolha dos materiais, à qualidade do material e da construção e à manutenção do revestimento ao longo de sua vida útil.

Ao falarmos de revestimento, Fiorito (1994) ressalta que deveríamos usar a expressão “estrutura de revestimento”. Na realidade, qualquer que seja a natureza do revestimento final de uma parede ou piso deve-se sempre considerá-lo como um conjunto de camadas ligadas. Todas as camadas de suporte do revestimento têm deformações próprias devido a sua secagem (retração). Além disso, no caso de revestimento cerâmico, o material cerâmico não é totalmente estável, uma vez que se expande em menor ou maior grau de deformação, em função da umidade natural e da variação térmica do ambiente, 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 desagregar e, então, ocorrer uma ruptura de ligação do revestimento com a camada de suporte. Nesse último caso, devido à presença de tensões de compressão, se instalará um processo de flambagem (Timoshenko, 1961), ficando o revestimento irremediavelmente deteriorado e havendo, inclusive, o deslocamento do revestimento como mostrado na Figura 1.2.

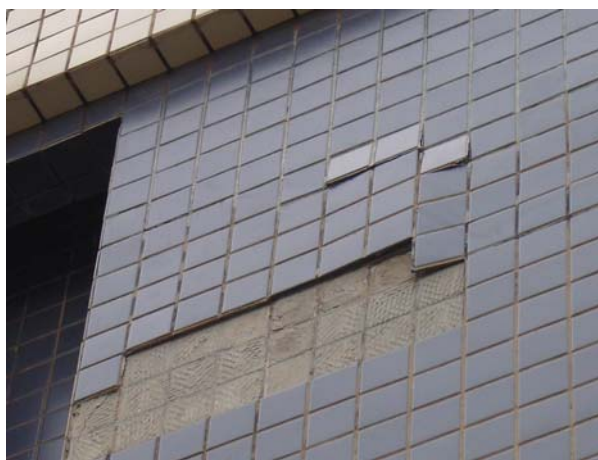


Figura 1.2 - Deslocamento de revestimento cerâmico em fachadas

Selmo (1989), Saraiva (2001) e Araújo Jr (2004) comentam que, independentemente da natureza do material, os agentes atuantes sobre a superfície externa dos edifícios são: forças e cargas de impacto, fogo, animais, plantas e microorganismos, temperatura ambiente, radiação, luz e vibrações. Ainda ressaltam que, “os principais agentes de degradação dos revestimentos são aqueles relacionados com a agressividade do clima, devendo-se salientar que a degradação causada por agentes climáticos combinados produz efeito muito maior do que se fossem considerados atuando isoladamente”. Selmo ainda cita uma pesquisa realizada pelo “*Technical Committee on Mortars and Renderings, 13-MR*”, da RILEM em 1982, que identificou, entre outras vinte e quatro, as principais causas que mais afetam o comportamento dos revestimentos externos: (a) Movimentações higroscópicas no revestimento; (b) Movimentações térmicas do revestimento; (c) Movimentações higroscópicas da base; (d) Movimentações térmicas na base; (e) Incidência de chuvas e ventos sobre a superfície.

Ainda, no que diz respeito às principais patologias que são encontradas no sistema de revestimento, Fiorito (1994) cita que a mais freqüente é o deslocamento do revestimento cerâmico. Essa patologia pode ser provocada por inúmeros fatores como, por exemplo: (1) Falta de aderência entre as camadas dos diversos materiais; (2) A expansão, por umidade, das peças cerâmicas; (3) A retração excessiva das argamassas ocasionando fissuras que provocarão uma futura perda de aderência das camadas do revestimento; (4) O surgimento de tensões decorrentes de efeito térmico que pode romper o sistema de revestimento cerâmico por fadiga.

É importante ainda, notar que o revestimento cerâmico é geralmente empregado nas fachadas das edificações com o auxílio de diferentes materiais que possuem, conseqüentemente, diferentes características físico-mecânicas. Essas diferenças de propriedades em conjunto com ações solicitantes, entre elas, a insolação, podem produzir estados de deformações e tensões nas fachadas que são, ainda, muito pouco conhecidos e escassamente pesquisados. Entre as deformações nos revestimentos, observa-se que, aquelas de origem termomecânica podem gerar sérios problemas patológicos, como o deslocamento do revestimento cerâmico, em virtude da grande variação em deslocamentos (dilatação térmica) às quais as fachadas ficam submetidas (Saraiva, 1998). Portanto, apesar de o sistema de revestimento cerâmico estar sujeito a tensões de diversas naturezas atuando simultaneamente, destaca-se que aquelas de origens térmicas são,

enfaticamente, reportadas como principal responsável pelo deslocamento de peças cerâmicas, seja nas primeiras idades ou após longo período (Fiorito, 1994).

Thomaz (1989), alerta que as fissuras em argamassas de revestimento provocadas por movimentações térmicas das paredes, irão depender, sobretudo, do módulo de elasticidade da argamassa, sendo desejável que a capacidade de deformação do revestimento supere, com boa folga, a capacidade de deformação da parede propriamente dita. Caso não seja possível, deve-se fazer o uso de juntas de dilatação capazes de absorver as deformações no sistema de revestimento. No caso específico do sistema de revestimento cerâmico, o emprego de materiais com propriedades mecânicas muito diferentes, como por exemplo, argamassas, peças cerâmicas e rejunte, podem gerar esforços que, atuando com certa frequência, podem romper o sistema de revestimento.

1.2 – MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Do exposto acima, surge a motivação desta pesquisa, tendo presente não só a importância do tema, ou seja, do entendimento melhor das patologias, principalmente, do deslocamento de revestimentos cerâmicos, bem como, das dificuldades a serem encontradas devido ao reduzidíssimo número de publicações disponíveis na literatura. São raros os estudos encontrados na literatura sobre deslocamento de sistema de revestimento gerados por tensões cíclicas de origens térmicas que abordam o tema de forma analítica e experimental como pretende esta pesquisa.

Portanto, este trabalho tem como base investigações numéricas e experimentais para o estudo das tensões 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), na área de materiais, com auxílio de ferramental experimental e numérico via Métodos dos Elementos Finitos, para melhor avaliar as tensões termomecânicas em sistema de revestimento de fachadas e suas conseqüências, como inicialmente abordados por Saraiva (1998) e Silva (2000).

O objetivo geral desta pesquisa é, portanto, analisar o comportamento de sistemas de revestimentos de fachadas por meio de um estudo experimental da argamassa sob carga cíclica, associando este estudo a uma simulação numérica completa do sistema de revestimento (com todos os seus materiais). Com isso, pretende-se apresentar uma

metodologia para a avaliação da resistência à fadiga ocasionada por tensões cíclicas termomecânicas que atuam no sistema de revestimento, quando o mesmo está submetido às variações de temperatura oriundas do meio ambiente. Outro fator importante de motivação para esta pesquisa, decorre da existência real de risco de morte em transeuntes que podem estar sujeitos a acidentes provocados por deslocamentos de revestimentos cerâmicos. Em resumo, esta pesquisa pretende:

- Apresentar uma metodologia para análise da vida útil de sistemas de revestimento, com o enfoque da ruptura por fadiga via métodos numéricos e experimentais;
- Levantar, experimentalmente, a resistência da argamassa sobre carregamento cíclico;
- Analisar a distribuição das tensões cíclicas no sistema de revestimento em fachadas, via método de elementos finitos;
- Analisar a resistência à fadiga do sistema de revestimento sob carregamento térmico, advindo do meio ambiente e de origem alternada;
- Avaliar os danos do efeito da fadiga na vida útil de alguns sistemas de revestimento.

1.3 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Este trabalho de dissertação está organizado em sete capítulos. Neste capítulo procurou-se abordar a importância do tema, a complexidade do assunto a ser tratado na dissertação e as motivações para a pesquisa.

No segundo capítulo são apresentados os principais trabalhos e pesquisas que formam o “estado da arte” na área de estudo do comportamento de sistema de revestimento cerâmico submetido às solicitações térmicas, suas tensões e deformações e o efeito da fadiga.

O terceiro capítulo descreve os conceitos e fundamentos teóricos aplicados nesta pesquisa com relação aos aspectos, fatores e variáveis que influenciam no surgimento de patologias no sistema de revestimento cerâmico e do fenômeno de fadiga. Abordam-se, também, os fenômenos das trocas de calor nas fachadas, as tensões atuantes, a mecânica de descolamento de cerâmicas nas fachadas e o fenômeno da acumulação de danos.

O quarto capítulo apresenta a metodologia usada na realização dos ensaios experimentais para a caracterização da argamassa industrializada que é usada neste trabalho, bem como, a metodologia para o ensaio à fadiga dessa argamassa, visando a obtenção da Curva S-N (curva que relaciona tensões alternadas com o número de ciclos).

No quinto 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 transientes adotados.

O sexto capítulo apresenta os resultados e discussões sobre a análise das tensões normais nos eixos X e Y e tensões de cisalhamento XY do modelo numérico referente ao sistema de revestimento estudado. Neste capítulo também são analisados os resultados de fadiga proveniente do transiente térmico.

Por fim, o sétimo capítulo, cita as principais conclusões e evidências constatadas neste trabalho e apresenta sugestões para futuras pesquisas.

2 - REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

2.1 – INTRODUÇÃO

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 (especificações técnicas de produtos cerâmicos) (ABC, 1996), são freqüentes os relatos de patologias como o deslocamento de peças cerâmicas do revestimento, seja nas primeiras idades do revestimento ou, mesmo, após longo período de utilização (Da Silva et al. 1998).

O sistema de revestimento cerâmico em fachadas, embora larga e tradicionalmente empregado no Brasil, apresenta manifestações patológicas (danos) cujos mecanismos ainda são pouco entendidos. Tais patologias podem ter suas origens tanto na falta de planejamento de execução, bem como, nos 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 (rejuntas) 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 rejuntas, bolores, empolamentos e fixação, freqüentemente observados nos revestimentos à base de argamassa e pintura, ou em acabamentos em pedras naturais, entre outros (Saraiva, 1998).

Em suma, 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 entende-se que, o campo de tensão ao quais tais sistemas de revestimentos estão sujeitos, bem como, a ciclagem deste campo de tensão constitui fatores importantes cujos mecanismos causadores das patologias devem ser ainda melhor entendidos. Portanto, descrevemos a seguir, 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.

2.2 – PESQUISAS SOBRE AS TENSÕES NO 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 da 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 anagem, 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 aderência à tração 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 o 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 a 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 rejuntas ou nos adesivos, ou por fissuras das cerâmicas ou do substrato.

Da Silva et al (1998) ressaltam 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.

Saraiva, Bauer e Bezerra (1999, 2001) realizaram estudos numéricos, via Método dos Elementos Finitos, para analisar as tensões na interface entre argamassa colante e 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 rejuntas 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 que compõem o sistema.

Lobato Paes e Carasek (2000, 2001) realizaram pesquisa experimental para estudar os efeitos do gradiente térmico 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 a 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 a 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.

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.

2.3 – PESQUISAS EM FADIGA NO SISTEMA DE REVESTIMENTO E CONCRETO

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

Tam et al. (1993) realizaram 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 resistência potencial de aderência a tração do que na tensão de cisalhamento. Baseado na maior taxa de deterioração na ligação de aderência, a deterioração significativa foi detectada depois de 18.250 ciclos, correspondente a exposição de 50 anos (18250/366).

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 deslocamento 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 uma tensão de compressão. Uma variação térmica poderá diminuir ou aumentar esta compressão. Uma seqüência de variações térmicas, oscilando para mais e para menos, poderá romper, gradativamente, por fadiga, a ligação revestimento/substrato.

Cervo (2004) realizou um trabalho que tinha como objetivo apresentar os resultados de uma pesquisa experimental laboratorial sobre a resistência à fadiga de um concreto de cimento Portland convencional para pavimentos, o que permitiu a construção de modelos de ruptura por fadiga para material, tipicamente, empregado em obras de pavimentação em São Paulo. Também se estudou o processo de fadiga do concreto por meio de ensaios conduzidos em regime de tensão constante (prática convencional) como, também, com ensaios em tensão variável, aferindo-se ainda os efeitos decorrentes da variação na freqüência de aplicação das cargas, bem como, da saturação de amostras. Os resultados sugerem o emprego de estudos com concretos nacionais para supressão de modelos importados que não podem representar o comportamento de misturas locais.

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.

Em outro estudo realizado por Tepfers e Kutti (1979) foi desenvolvido um modelo à fadiga apoiado em compressão. Posteriormente, os autores verificaram, por meio de análise estatística, que a expressão poderia ser aplicada, também, para ensaios à fadiga em tração.

3 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados os conceitos e fundamentos teóricos utilizados nesta pesquisa. Dentre eles, serão apresentados a composição de um sistema de revestimento cerâmico; as principais causas de patologias no sistema de revestimento decorrentes das propriedades dos materiais, das tensões atuantes e do efeito da temperatura no sistema de revestimento; a análise do fenômeno da fadiga no revestimento causada por efeitos térmicos cíclicos e suas conseqüências e, a troca de calor entre as camadas do sistema de revestimento cerâmico que geram as tensões de origem térmica que podem provocar o colapso do sistema e o fenômeno da fadiga.

As tensões de tração, compressão e cisalhamento de origem térmica são as principais responsáveis pelo deslocamento de peças cerâmicas, pois provocam movimentos de expansão e contração que podem prejudicar a aderência dos revestimentos cerâmicos. Representam um elemento importante na análise da resistência à fadiga do sistema. As tensões geradas, a partir da variação cíclica de temperatura nas camadas do sistema de revestimento, são comparadas com as tensões de resistência dos materiais do modelo, a fim de analisar o processo de fadiga dos materiais.

São apresentadas as curvas de Von-Mises e Coulomb-Mohr usadas para análise de fadiga em materiais dúcteis e frágeis, respectivamente. Considerando que a argamassa é um material frágil, assim como o concreto, que é bastante estudado na engenharia pela sua versatilidade, a análise de resistência à fadiga da argamassa pode ser feita através da curva de Coulomb-Mohr (ou similar) usada, também, para o concreto. Essa curva define as tensões de resistência do material e, pode ser usada para comparar com as tensões geradas pela variação cíclica de temperatura no sistema, indicando se há ou não risco de colapso da estrutura.

Todos esses conceitos e fundamentos teóricos são necessários para a definição dos procedimentos e das análises feitas nos capítulos seguintes deste trabalho, que envolvem a realização dos ensaios experimentais, a definição dos transientes de temperatura do modelo

numérico, o cálculo das temperaturas internas entre as camadas do sistema e, por fim, a análise de resultados tanto dos ensaios experimentais quanto das tensões e temperaturas obtidas das análises numéricas em elementos finitos.

3.2 – SISTEMA DE REVESTIMENTO E SUAS PATOLOGIAS

Os sistemas de revestimentos para fachadas podem ser compostos por diversos materiais, geralmente dispostos em camadas. Dentre os tipos de revestimentos utilizados em fachadas no Brasil, destacam-se os revestimentos cerâmicos, além dos revestimentos de pedras naturais, como o mármore ou o granito, ou mesmo simplesmente feitos de argamassa com posterior aplicação de pintura, revestimentos em placas laminadas em metal e madeira ou materiais vinílicos e, revestimento têxtil ou argamassa e papel de parede (Cincotto, Silva e Carasek, 1995). Este trabalho visa estudar o sistema de revestimento composto por argamassa colante e peças cerâmicas, visto que se trata de um tipo de revestimento de larga utilização na indústria da construção civil.

Os revestimentos cerâmicos são sempre constituídos de diversas camadas de materiais diferentes ligados entre si (Fiorito, 1994). Essas camadas são, inicialmente, formadas por uma base ou substrato (que pode ser em concreto, alvenaria, etc.), depois uma camada de chapisco, em seguida, a argamassa de emboço, uma pasta de cimento ou argamassa colante e, finalmente, o revestimento cerâmico cujo espaço entre as cerâmicas é preenchido por rejunte. Esse conjunto de camadas do sistema de revestimento cerâmico deve ter um comportamento monolítico aderido ao substrato. A Figura 3.1 (Junginger, 2003) ilustra bem essas camadas:

- A camada de chapisco fornece a aderência adequada entre a camada de regularização e o substrato;
- A camada de regularização serve para deixar a superfície de aplicação da cerâmica sem depressões e saliências indesejáveis;
- A camada de fixação tem a função de manter as placas cerâmicas indiretamente aderidas ao substrato;
- Por fim, os revestimentos cerâmicos, geralmente, apresentam juntas que são preenchidas de rejunte com a finalidade de garantir beleza e estanqueidade à fachada. Dependendo ainda do tipo de base, pode ser necessária a utilização de

juntas de trabalho ou de movimentação para dissipação de tensões advindas das deformações da base (Saraiva, 1998).

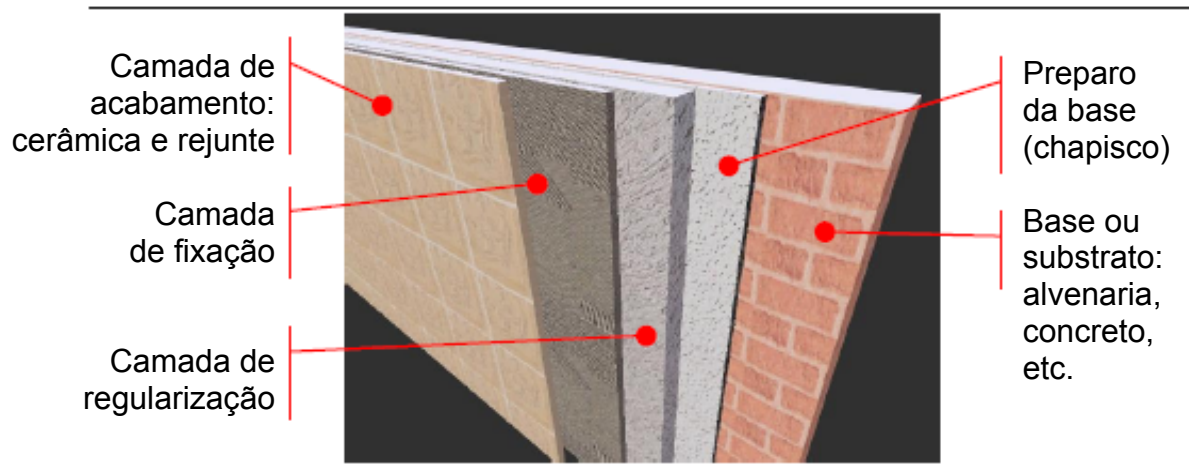


Figura 3.1 - Estrutura de sistema de revestimento (Junginger, 2003)

3.2.1 – Funções, Propriedades e Comportamentos do Sistema de Revestimento

Apesar dos inúmeros fatores que levam à utilização do sistema de revestimento cerâmico para fachadas, podem ser observadas algumas patologias, sendo que, o deslocamento de peças cerâmicas é considerado uma das mais graves.

As patologias observadas no sistema de revestimento decorrem, principalmente, da falta de conhecimento técnico dos materiais, da carência de técnicas construtivas e da 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 propriedades e cumpra as suas funções, contribuindo para o adequado desempenho do revestimento cerâmico 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;

- Regularizar a superfície dos elementos de vedação;
- Proporcionar acabamento final aos revestimentos de pisos e paredes.

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

- *Aderência*: capacidade de permanecer aderido à base;
- *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 características que proporcionem o isolamento, a estanqueidade e a segurança contra fogo;
- *Durabilidade e eficiência*: permanecer inalterado durante a vida útil do ambiente.

A obtenção dessas propriedades está relacionada às características da peça cerâmica, ao tipo de material utilizado para fixação da peça 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.

3.2.3 – Tensões no Revestimento Cerâmico que Influenciam na Patologia

O uso do sistema de revestimento cerâmico em acabamento de fachadas de edifícios, sem o conhecimento adequado do seu comportamento mecânico (deformações e tensões), pode favorecer o surgimento de patologias, que podem causar sérios danos em uma fachada ou, até mesmo, em caso de deslocamento, graves acidentes.

Segundo Fiorito (1994), no sistema de revestimento cerâmico, todas as camadas estão intimamente ligadas entre si, existindo maior ou menor grau de ligação (aderência) entre elas. A deformação de qualquer uma delas devido a causas endógenas ou esforços

externos, resultará em tensões atuando sobre cada camada. Essas camadas devem se comportar solidariamente como se fosse uma só. Ou seja, se um componente falhar, pode comprometer todo o conjunto do sistema. As deformações podem tanto se compensar, como também se somar, gerando neste último caso, tensões máximas que, se forem superiores à resistência mecânica do material ou das interfaces entre eles, podem levar ao colapso do sistema de revestimento. Entre as deformações existentes no sistema de revestimento cerâmico podemos citar:

- A retração da argamassa que liga os elementos das alvenarias;
- A retração da argamassa utilizada no emboço ou no contrapiso;
- A deformação lenta do concreto da estrutura atuando sobre os revestimentos cerâmicos;
- Recalque das fundações;
- As deformações originadas pela variação da umidade relativa do ar atuando sobre as argamassas endurecidas;
- A dilatação higroscópica dos elementos cerâmicos;
- As deformações originadas pela atuação de cargas acidentais;
- As deformações originadas por variações térmicas;
- Em casos especiais, devem ser levadas em conta as vibrações de máquinas e outros.

As camadas do sistema de revestimento cerâmico podem estar sujeitas às tensões de tração; de compressão e de cisalhamento.

O efeito das tensões nos sistemas de revestimento pode ser entendido observando-se a Figura 3.2 (Fiorito, 1994), inicialmente à temperatura ambiente (Figura 3.2a). As tensões de tração sobre o sistema de revestimento cerâmico da Figura 3.2a, podem ser causadas por um aumento gradativo da temperatura do sistema ($T_1 > T$) (Figura 3.2b), que causa o afastamento das placas umas das outras, fazendo com que as juntas se abram.

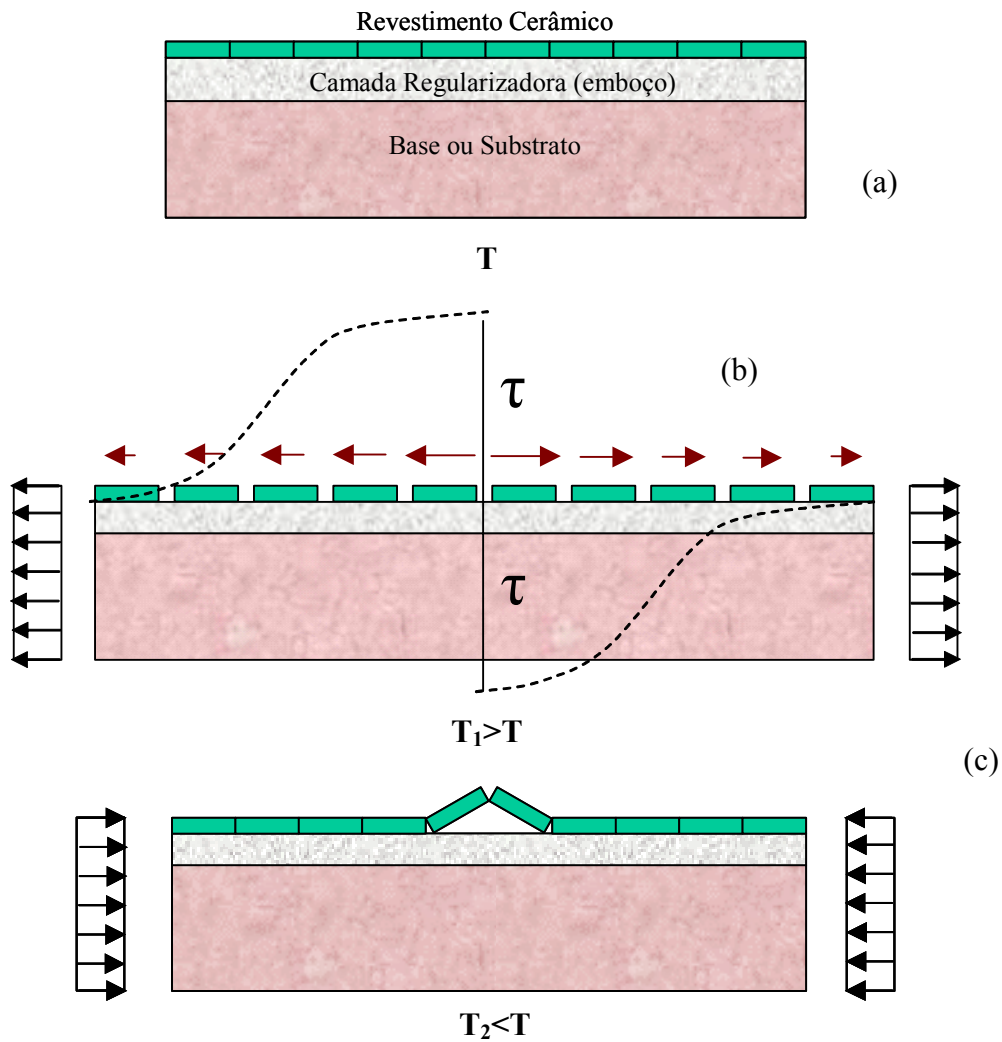


Figura 3.2 - (a) Sistema à temperatura ambiente (T); (b) Cerâmicas sob tensão de tração e cisalhamento ($T_1 > T$) e (c) peças soltas devido à compressão ($T_2 < T$) (Fiorito, 1994)

O surgimento da tração entre camadas de materiais diferentes dá origem, também, ao aparecimento de tensões de cisalhamento entre a base das peças (tardoz) e a argamassa colante. A Figura 3.2b ilustra a distribuição simétrica da tensão de cisalhamento. Se a resistência de aderência da interface da argamassa colante e cerâmica for inferior ao cisalhamento atuante, as placas da base se soltarão da camada regularizadora. Em seguida, a queda gradual de temperatura ($T_2 < T$), causa o encurtamento da base que, no caso da perda da resistência de aderência na interface argamassa colante e cerâmica, provoca o desprendimento das peças cerâmicas, fazendo as peças soltas assumirem a forma de um “V” invertido, como podemos observar na Figura 3.2c.

A tensão de compressão no sistema de revestimento cerâmico também pode ser causada pela retração da camada regularizadora (emboço). Desta forma, as peças cerâmicas tendem a se aproximar umas das outras provocando a flambagem das peças. O mecanismo está ilustrado na Figura 3.3a, 3.3b, 3.3c e 3.3d.

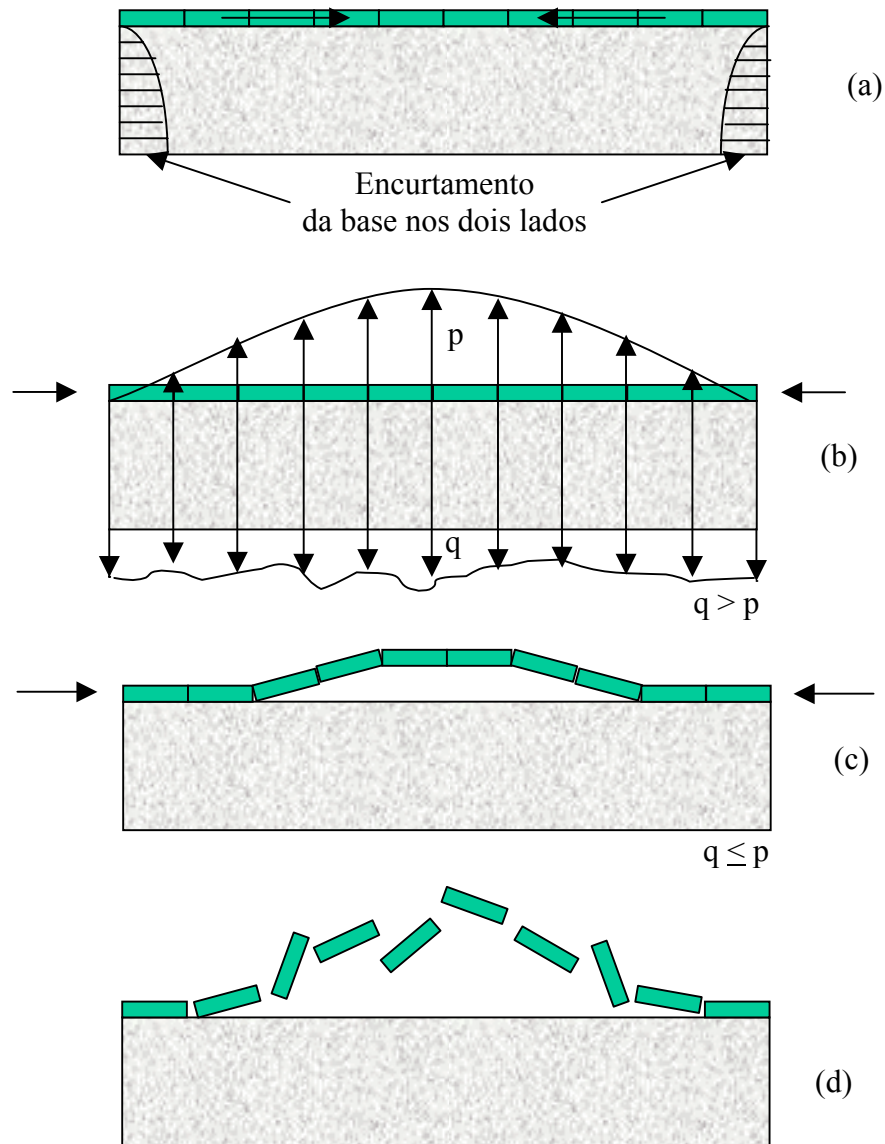


Figura 3.3 - Colapso do sistema de revestimento (Fiorito, 1994)

Nas extremidades das peças existem tensões de compressão e de cisalhamento atuando na interface entre peça cerâmica e argamassa colante (Figura 3.3a). Isto provoca o aparecimento de tensões de compressão agindo no centro do revestimento sobre a seção transversal das peças cerâmicas. Essa compressão dá origem aos componentes verticais de tração (p), os quais tendem a arrancar o revestimento da sua base (Figura 3.3b). A eles se opõe a aderência (q), resistência proporcionada pela argamassa colante utilizada na fixação

do revestimento. Se a aderência for maior que o componente de tração ($q > p$), haverá compressão no sistema, mas o revestimento permanecerá estável (Figura 3.3b). Porém, se a aderência for menor que o componente de tração ($q \leq p$), as peças tendem a se soltar da base por tração simples, causando o abaulamento (Figura 3.3c) das peças de revestimento e seu posterior colapso, conforme mostrado na Figura 3.3d.

Do exposto acima, o deslocamento do sistema de revestimento cerâmico, provocado pelas tensões de tração e compressão atuantes sobre o sistema, pode causar prejuízos econômicos expressivos. O colapso do sistema de revestimento pode, até mesmo, ocasionar acidentes fatais se cair sobre pedestres. O risco de colapso do sistema de revestimento existe e, para diminuir este risco, certos cuidados no planejamento e execução do sistema de revestimento podem ser adotados. Entre estes cuidados podemos destacar:

- Conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos diferentes materiais que formam o sistema de revestimento;
- Controle de cura, para amenizar, a retração da argamassa de emboço em função da perda de água;
- Aplicação correta das juntas de dilatação e de assentamento entre as peças cerâmicas para limitar as tensões térmicas ou de outras origens, evitando o risco de flambagem para melhorar a estabilidade dos revestimentos;
- Mão-de-obra treinada e especializada no domínio de execução do revestimento cerâmico.

Campante e Baía (2003) ressaltam que as patologias são evidenciadas por alguns sinais que, embora muitas vezes apareçam em alguns componentes, podem ter origem em outros componentes do revestimento. Quando há o deslocamento da peça cerâmica, isto não significa, necessariamente, que o problema foi causado pela própria peça cerâmica, mas, por exemplo, pela falta de treinamento de mão-de-obra, que (entre outros procedimentos) pode não ter respeitado o tempo em aberto da argamassa colante.

Portanto, o problema do colapso de revestimentos é complexo e, as tensões térmicas figuram como uma das principais responsáveis pelo deslocamento de peças, pois provocam movimentos de expansão e contração que podem prejudicar a aderência dos

revestimentos cerâmicos. Quantificar a ação das tensões térmicas e dos mecanismos de fadiga para avaliação dos mecanismos de colapso dos sistemas de revestimentos é, portanto, uma tarefa muito importante.

3.2.4 – Efeito Térmico no Revestimento Cerâmico que Influencia na Patologia

A ocorrência de alguma deformação em uma das camadas do sistema de revestimento resultará no aparecimento de tensões em todo o conjunto. Essas tensões dependem das características físicas de cada camada, bem como, da sua espessura e do seu módulo de elasticidade. Se um sistema de revestimento está sujeito a uma variação cíclica de temperatura, esse sistema pode falhar após certo número de ciclos de aplicações, mesmo que, a máxima tensão atuante no revestimento em um simples ciclo, seja menor que a tensão de ruptura do material.

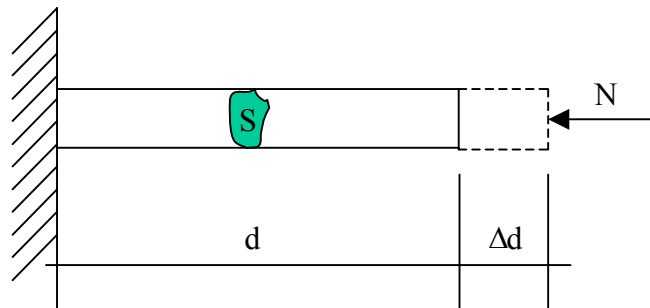


Figura 3.4 - Barra sujeita a um efeito térmico

Em uma abordagem simplificada, Fiorito (1994) diz que, para uma determinada barra de material homogêneo de seção “S”, submetida a um acréscimo uniforme de temperatura “ Δt ”, conforme a Figura 3.4, o aumento de comprimento da barra será calculado pela Equação (3.1):

$$\Delta d = \alpha \Delta t d \quad (3.1)$$

onde:

Δd = Variação do comprimento “d”;

α = Coeficiente de dilatação térmica;

Δt = Variação da temperatura;

d = Comprimento inicial.

A força axial para impedir o deslocamento “ Δd ” será calculada pela Equação (3.2):

$$N = -ES \frac{\Delta d}{d} \quad (3.2)$$

onde:

N = Esforço normal;

E = Módulo de elasticidade do material;

S = Seção transversal da barra de material homogêneo.

Substituindo a Equação 3.1 em 3.2, obtém-se a Equação 3.3:

$$N = -\alpha \Delta t ES \quad (3.3)$$

onde a barra está sujeita a tensão de compressão axial:

$$\sigma = -\alpha \Delta t E \quad (3.4)$$

A partir das equações acima, podemos verificar que os revestimentos e suas camadas suportes de argamassa, com substrato de alvenaria ou de concreto, sofrem deformações térmicas diferentes devido aos seus módulos de deformação, coeficientes de dilatação térmica linear e, principalmente, deformações causadas pela diferença de temperatura entre as faces externa e interna dos edifícios ou, ainda, pelas condições ambientais de temperatura.

A variação da temperatura no sistema de revestimento, dependendo da sua intensidade, é o fator predominante para o aumento ou diminuição das tensões, e somada a outros fatores, poderá provocar manifestações de patologias ao sistema. Dessa maneira, torna-se importante o conhecimento de todas as variáveis que interferem no equilíbrio mecânico e que possam favorecer o surgimento de tensões elevadas, prejudiciais ao desempenho do sistema de revestimento.

A Figura 3.5 mostra o efeito causado pela variação de temperatura na interface entre o revestimento e a argamassa.

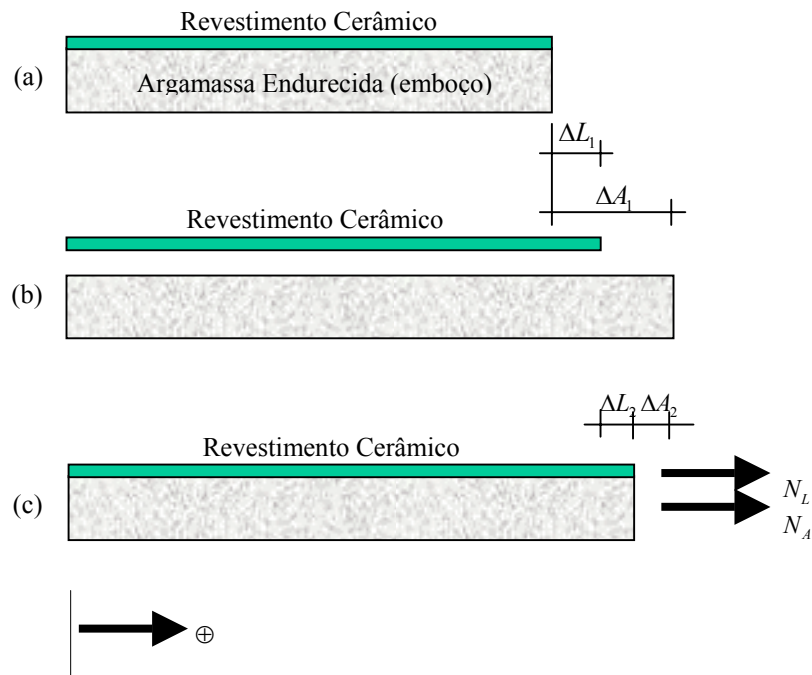


Figura 3.5 - Esforços causados pela temperatura no revestimento

Na Figura 3.5a, uma variação de temperatura ΔT , uniforme nas duas camadas, produzirá os deslocamentos do revestimento (ΔL_1) e da argamassa (ΔA_1) – Figura 3.5b. Entretanto, o revestimento e a argamassa estão intimamente ligados e, as forças internas N_L e N_A , que deverão estar sempre em equilíbrio, produzirão os deslocamentos do revestimento (ΔL_2) e da argamassa (ΔA_2) – Figura 3.5c.

As Equações 3.5 e 3.6 mostram o cálculo dos deslocamentos do revestimento e da argamassa. São eles:

$$\Delta L_1 = \alpha_1 \Delta t d \quad (3.5)$$

$$\Delta A_1 = \alpha_A \Delta t d \quad (3.6)$$

Nas camadas de revestimento e argamassa, temos:

$$\Delta L_2 = \frac{N_L}{E_L S_L} (d + \Delta L_1) \quad (3.7)$$

$$\Delta A_2 = \frac{N_A}{E_A S_A} (d + \Delta A_1) \quad (3.8)$$

a partir das condições

$$N_A + N_L = 0 \quad (3.9)$$

$$\Delta L_1 + \Delta L_2 = \Delta A_1 + \Delta A_2 \quad (3.10)$$

e com a aproximação

$$(1 + \alpha_L \Delta t) = (1 + \alpha_A \Delta t) = 1 \quad (3.11)$$

obtém-se

$$N_L = \frac{E_L S_L}{1 + \frac{E_L S_L}{E_A S_A}} (\alpha_A - \alpha_L) \Delta t \quad (3.12)$$

Como o coeficiente de dilatação térmica linear da argamassa α_A é, geralmente, maior que o coeficiente de dilatação térmica linear do revestimento α_L , o sentido de N_L dependerá de Δt . Assim, para uma queda de temperatura uniforme em toda a estrutura do revestimento, haverá compressão no revestimento e tração na argamassa. E, para uma elevação de temperatura uniforme em todo conjunto, haverá tração no revestimento e compressão na argamassa.

Para uma faixa de largura unitária: $S_L = e_L$ e $S_A = e_A$, onde e_L e e_A são espessuras do revestimento e da argamassa, a tensão térmica no revestimento e na argamassa será:

$$\sigma_L = \frac{E_L}{1 + \frac{E_L e_L}{E_A e_A}} (\alpha_A - \alpha_L) \Delta t \quad (3.13)$$

$$\sigma_A = \frac{N_A}{e_A} \text{ sendo } N_A = -N_L \quad (3.14)$$

Através das análises elaboradas por Fiorito (1994), para um aumento de temperatura uniforme no sistema de revestimento intimamente ligado, mas com deslocamento livre nas laterais, pode-se concluir que:

- Há tensão de tração no revestimento;
- Não há variação significativa das tensões térmicas de compressão em função da espessura ou traço das argamassas;
- As juntas entre as peças do revestimento cerâmico, ou outro revestimento rígido, mais as juntas dividindo o revestimento em painéis e, mais as juntas entre o revestimento e outros acabamentos ou saliências, são imprescindíveis para a estabilidade do revestimento.

As temperaturas incidentes sobre os sistemas de revestimento cerâmico podem ser analiticamente obtidas. Para isso é importante estabelecer os mecanismos de troca de calor nas fachadas das edificações.

3.3 – TROCA DE CALOR EM FACHADAS

Na análise do comportamento térmico de edificação, o sol é uma importante fonte de calor, que atua em função da intensidade da radiação solar incidente e das características térmicas dos materiais empregados nas edificações (Thomaz, 1989). No sistema de revestimento, os efeitos da radiação solar sobre os componentes do sistema dependem dos seguintes fatores:

- Intensidade da radiação solar determinada pela localização (latitude/longitude), inclinação solar (hora do dia) e orientação da fachada;
- Coeficiente de absorção térmica do material que depende, basicamente, da cor da superfície. As superfícies de cores escuras têm maiores coeficientes de absorção da

radiação solar, o que significa que elas atingem temperaturas mais elevadas que as superfícies de cor clara, nas mesmas condições de insolação;

- Condutância térmica da superfície das camadas, onde as trocas de calor entre a superfície exposta de uma camada da fachada e o ar ambiente dependem, não somente da diferença de temperatura verificada entre os mesmos, como também de outras condições (rugosidade da superfície, velocidade do ar, posição geográfica do edifício, orientação da superfície, etc.);
- Diversas outras propriedades térmicas dos materiais: calor específico, massa específica, coeficiente de condutibilidade térmica e o coeficiente de dilatação térmica.

Os mecanismos de troca de calor por condução através de paredes expostas à radiação solar e sujeitas a uma diferença de temperatura entre os ambientes que separa, são mostrados na Figura 3.6.

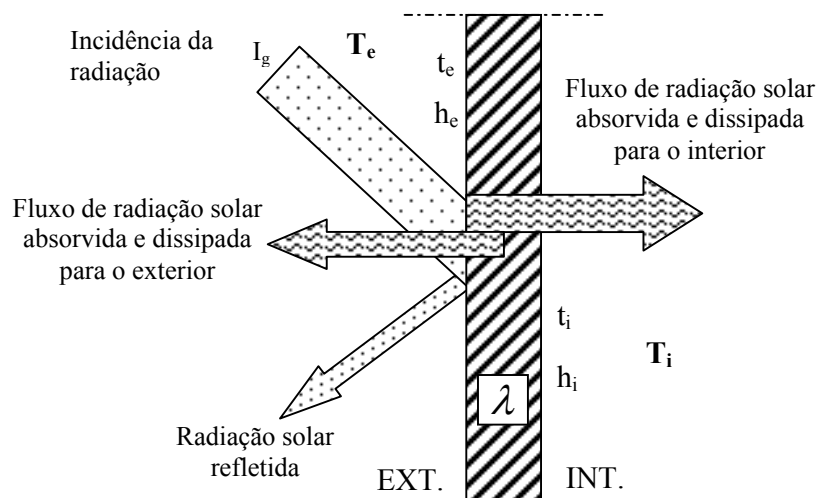


Figura 3.6 - Troca de calor através de paredes segundo Frota e Schiffer (2003)

onde:

I_g = Radiação solar (W/m^2);

T_e = Temperatura externa do ambiente ($^{\circ}C$);

T_i = Temperatura interna do ambiente ($^{\circ}C$);

t_e = Temperatura externa do revestimento ($^{\circ}C$);

t_i = Temperatura interna do revestimento ($^{\circ}C$);

h_e = Coeficiente de condutância térmica superficial externa ($W/m^2^{\circ}C$);

h_i = Coeficiente de condutância térmica superficial interna ($W/m^2°C$);

λ = Coeficiente de condutância térmica ($W/m^2°C$).

O perfil de temperatura usado na modelagem numérica, posteriormente adotada neste trabalho para simular as tensões de origem térmica no sistema de revestimento cerâmico de fachada, está baseado na abordagem definida por Rivero (1985) e Frota e Schiffer (2003).

A análise do fluxo térmico em termo de deformações e tensões de uma parede em regime variável apresenta-se diferente em função do clima frio ou quente (inverno ou verão). No período frio, o estudo do comportamento térmico baseia-se apenas nas variações da temperatura do ar e, no período quente, temos também o parâmetro da radiação solar que representa uma importante variável. Neste último caso, utilizamos o conceito de temperatura equivalente, também conhecido como temperatura sol-ar, para determinar a temperatura do sistema.

Define-se a temperatura equivalente como sendo a temperatura de um meio exterior isotérmico, hipotético que origina um processo de transmissão de calor na superfície de parede, igual ao que seria originado em condições reais; ou seja, levando em conta as trocas de calor por convecção com o ar e por radiação com todos os corpos que envolvem a superfície. Para o cálculo da temperatura equivalente é utilizada a seguinte equação:

$$t_q = T_e + \frac{\alpha \cdot I_g}{h_e} - \frac{\varepsilon}{h_e} \cdot \Delta I_L \quad (3.15)$$

onde:

t_q = Temperatura equivalente em $°C$;

T_e = Temperatura do ar em $°C$;

α = Coeficiente de absorção da superfície da parede diante da radiação solar;

I_g = Radiação solar global incidente na superfície em W/m^2 ;

h_e = Condutância superficial exterior da parede em $W/m^2.°C$ (valor que leva em conta os intercâmbios de calor por convecção e por radiação entre a superfície e o meio);

ε = Emissividade da superfície;

ΔI_L = Diferença entre a radiação de onda longa emitida pela superfície em W/m^2 .

Na equação anterior, Rivero (1985) considera, segundo dados experimentais, que o termo $(\varepsilon/he)\Delta I_L$ é igual a 4°C para o plano horizontal e, 0°C para o plano vertical, em qualquer hora do dia. Essa definição de valores deve-se ao fato que as camadas altas da atmosfera têm sempre uma baixa temperatura fazendo com que o plano horizontal perca permanentemente energia por radiação e, nos planos verticais, a perda fica compensada pela radiação recebida do solo e das outras superfícies do meio. A maioria das fachadas está no plano vertical. Para este estudo considerou-se $(\varepsilon/he)\Delta I_L = 0$.

Para o cálculo das temperaturas internas é usado um modelo como o apresentado na Figura 3.7. Para se encontrar as temperaturas (t_2 , t_3 , t_4 e t_5) do sistema de revestimento cerâmico modelado, foi utilizado o método apresentado por Costa (1974), onde estão definidos os conceitos de resistência térmica (Rt) e fluxo térmico (Q), mostrados nas equações seguintes:

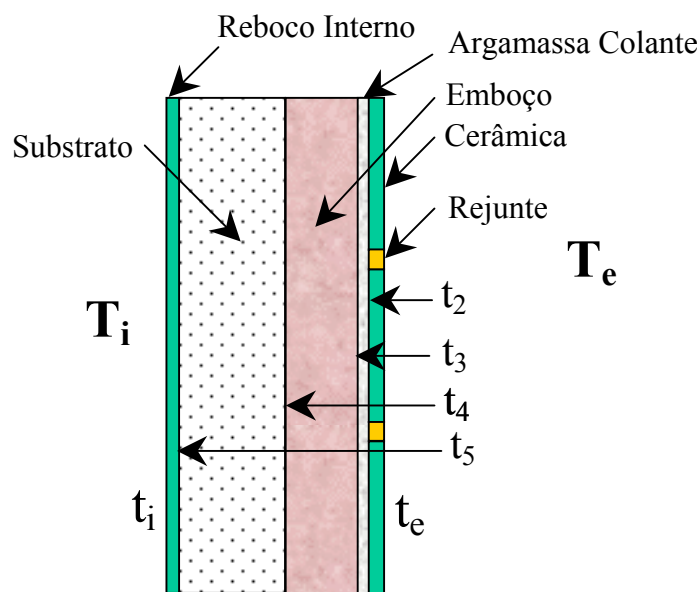


Figura 3.7 - Demonstração da leitura de temperatura nas interfaces do revestimento

$$Rt = \frac{\Delta t}{Q} \quad (3.16)$$

sendo:

$$Q = K.S. \frac{\Delta t}{L} \quad (3.17)$$

então:

$$R_t = \frac{L}{K \cdot S} \quad (3.18)$$

onde:

R_t = Resistência térmica ($^{\circ}\text{C}/\text{Kcal}/\text{h}$);

Δt = Diferença potencial térmico ($^{\circ}\text{C}$);

Q = Fluxo térmico (Kcal/h);

K = Coeficiente de condutibilidade interna do material ($\text{Kcal}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$);

L = Espessura da camada (m);

S = Superfície através da qual se dá a passagem de calor (m^2).

Para o caso de parede composta por reboco interno, substrato, emboço, argamassa colante e cerâmica, a resistência térmica é definida por:

$$R_t = \sum \frac{L}{K \cdot S} \quad (3.19)$$

ou seja:

$$R_t = \frac{L_{\text{Cerâmica}}}{K_{\text{Cerâmica}} \cdot S} + \frac{L_{\text{Arg.colante}}}{K_{\text{Arg.colante}} \cdot S} + \frac{L_{\text{Emboço}}}{K_{\text{Emboço}} \cdot S} + \frac{L_{\text{Substrato}}}{K_{\text{Substrato}} \cdot S} + \frac{L_{\text{Reb.interno}}}{K_{\text{Reb.interno}} \cdot S} \quad (3.20)$$

Com as Equações 3.15 à 3.20, as temperaturas internas podem ser calculadas. Calculada a temperatura equivalente, “ t_q ”, pela Equação 3.15, onde “ T_e ” é a temperatura do ar, acha-se a diferença total $\Delta t = t_e - t_i$. Conhecendo-se, também, a resistência térmica R_t para todas as camadas envolvidas, calcula-se o Q na Equação 3.16. Em seguida acha-se, pela mesma equação $\Delta t = t_e - t_2$, com a resistência térmica R_t calculada para a região entre a “ t_e ” e a “ t_2 ”, e assim, sucessivamente, para cada camada até se conhecer a temperatura em todas as camadas. Este procedimento é feito para cada temperatura “ t_e ” do revestimento externo, nos tempos fornecidos conforme medições meteorológicas, ao longo do dia e anos. Nesta pesquisa será adotado um transiente típico a fim de se estudar as tensões no sistema de revestimento geradas por variação cíclica da temperatura. Será avaliado se o sistema de revestimento pode falhar, após certo número de ciclos de aplicações. Nota-se ainda que,

mesmo com tensões menores que a tensão de resistência dos materiais do sistema de revestimento, é possível que o sistema de revestimento possa falhar. Isso ocorre devido ao processo de fadiga dos materiais.

3.4 – FADIGA NO SISTEMA DE REVESTIMENTO

O processo de fadiga é um fenômeno físico caracterizado pela deterioração progressiva e irreversível do material, verificado após a aplicação de certo número de ciclos de carregamentos. A aplicação repetida destes carregamentos (ou ciclos de carga) ao longo do tempo pode causar a falha (fissura, rompimento, etc) do material. A fadiga pode ocorrer durante a aplicação dos primeiros ciclos de carga, após muitos ciclos de carga ou mesmo não ocorrer durante a vida útil da estrutura (ABNT, 2003 - NBR 6118, Anexo C).

A fadiga acontece por uma propagação de uma trinca ou fissura à medida que o carregamento cíclico é aplicado. O fenômeno pode ser subdividido em quatro fases distintas, conforme mostrado na Figura 3.8:

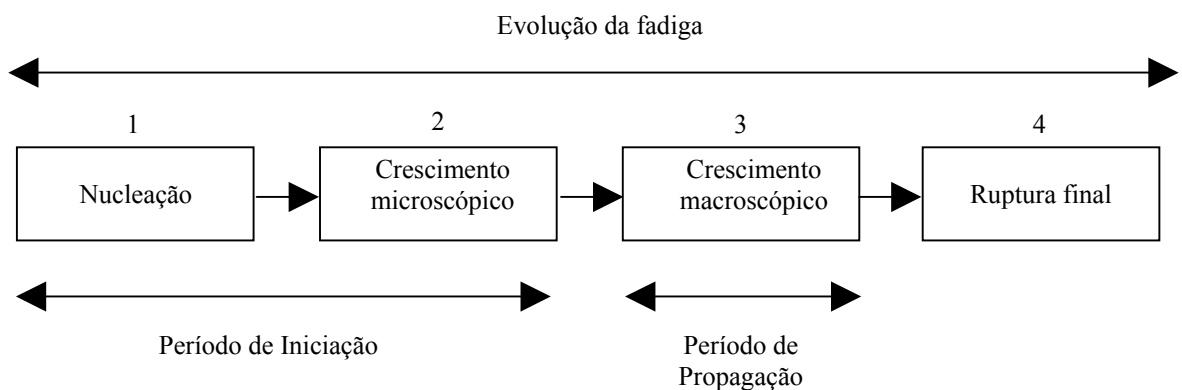


Figura 3.8 - Processo de fadiga

As duas primeiras fases constituem o período de iniciação da fissura. Na fase de nucleação há o surgimento de micro-fissuras. Na fase de crescimento, o acúmulo de dano se passa em nível microscópico no sentido de fazer crescer as micro-fissuras com o passar dos ciclos de carga. As fissuras nesta fase ainda são pouco profundas, quando comparadas com o tamanho da seção. Na terceira fase, partes das fissuras transformam-se em aberturas macroscópicas que se propagam na direção das regiões de maior concentração de tensões,

gerando uma instável e catastrófica fratura do material que corresponde à quarta fase, ilustrada na Figura 3.8.

À proporção que a fissura se propaga, o campo de tensão se transfere da parte com fissura para a parte ainda sem fissura do material. Na fase final ou da ruptura por fadiga da estrutura, o dano gerado pela propagação das fissuras é de tal forma que o material ainda sem fissura já não suporta os níveis altos de tensão alcançados e se rompe. Para se ter uma avaliação do risco de fadiga deve-se, portanto, estabelecer um critério sobre o acúmulo do dano – o que será abordado nas seções seguintes, mas, inicialmente, é importante entender como há o surgimento e o crescimento das fissuras. Para isso, recapitulamos, a seguir, os principais conceitos da mecânica da fratura.

3.4.1 – Mecânica da Fratura e a Fratura por Fadiga

A mecânica da fratura, entre outros objetivos, investiga a distribuição de tensão e deformação do material na vizinhança de uma trinca ou fissura. A mecânica da fratura passou a ser uma importante área de pesquisa quando muitos acidentes de ruptura estrutural, entre eles; navios, vasos de pressão, tetos de estações de trem, entre outros, aconteceram mesmo com níveis de tensão abaixo da tensão de ruptura dos materiais (Broek, 1988). Foi a ocorrência de fratura sob baixa tensão em estruturas feitas com materiais resistentes (como o aço de alta resistência), que proporcionou o desenvolvimento da Mecânica da Fratura. Uma trinca ou fissura num sólido pode estar sob três diferentes modos de carregamento (ver Figura 3.9): o modo de abertura, o modo de cisalhamento no plano e o modo de cisalhamento fora do plano (também conhecido como modo de rasgamento). Em resumo:

- Modo I – Fissura de tração normal;
- Modo II – Fissura de cisalhamento no plano;
- Modo III – Fissura de cisalhamento fora do plano - rasgamento.

Por mais complexa que seja a sollicitação numa trinca, ela pode ser reduzida a um destes modos de carregamento ou a uma combinação dos mesmos. Dentre os modos de carregamento, o mais importante é o modo de abertura (Modo – I), pois tende a aumentar,

de forma mais intensa, as fissuras; facilitando, desta forma, a propagação das mesmas até a ruptura do sólido ou estrutura.

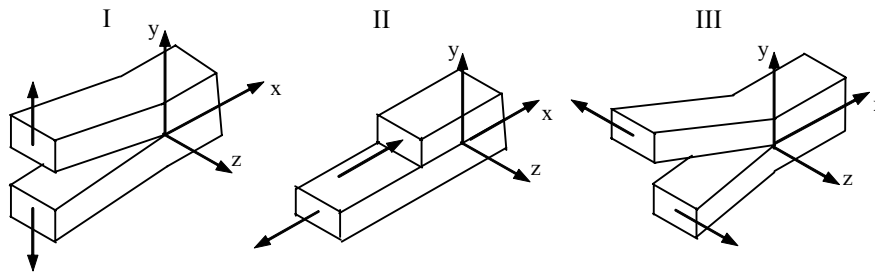


Figura 3.9 - Modos de carregamento básico de uma fissura

Na região da vizinhança da trinca, o campo de tensão e deformação é bastante intenso com fortes gradientes de tensão. Para um estado tridimensional de tensão, a complexidade da distribuição de tensão na ponta da trinca é de difícil visualização. Já para um estado plano de tensão, a situação é mais simples e pode ser visualizada na Figura 3.10. Nesta figura, a tensão σ representa uma tensão média de tração distante da trinca (solicitando a trinca com o Modo-I de carregamento). Observe que, numa região infinitesimal “dx – dy” (Figura 3.10), vizinha à ponta da trinca, há tensões normais e de cisalhamento.

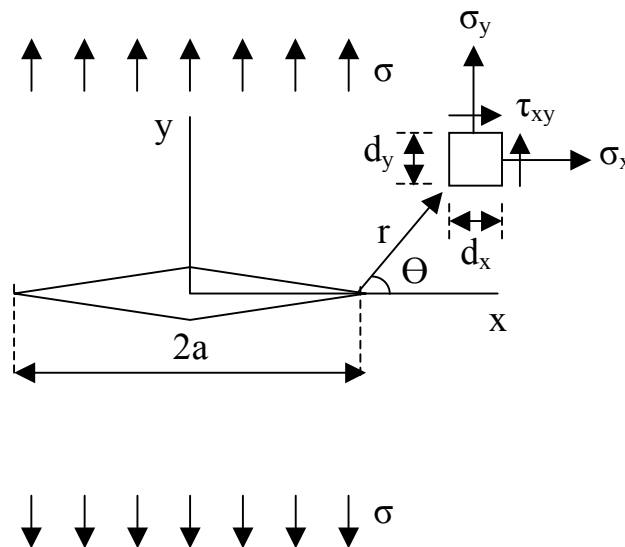


Figura 3.10 - Abertura de fissura sob tensão uniforme

Para um estado plano de tensão, dependendo da distância “r” e do ângulo “ θ ” de orientação da região infinitesimal (na realidade, do ponto onde se deseja conhecer a distribuição das tensões), as tensões podem ser dadas pelas seguintes equações:

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.21)$$

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.22)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3.23)$$

Observando as Equações 3.21, 3.22 e 3.23 nota-se que, para a ponta da trinca ($r \rightarrow 0$), todas as componentes de tensão tendem ao infinito. Obviamente, os materiais não suportam tensão acima das respectivas tensões últimas ou de ruptura. Portanto, a tendência do estado de tensão numa ponta de trinca é plastificar a ponta da trinca. Para materiais dúcteis, esta plastificação pode assumir dimensões bem maiores do que para materiais frágeis - como no caso da argamassa e de demais materiais frágeis. É neste estado complexo e de grande gradiente de tensão que as micro-trincas ou micro-fissuras se propagam com o aumento do número de ciclos de carga, ocasionando a fratura por fadiga do material ou da estrutura. A Figura 3.11 representa, teoricamente, a distribuição da tensão normal “ σ_y ” na ponta da trinca.

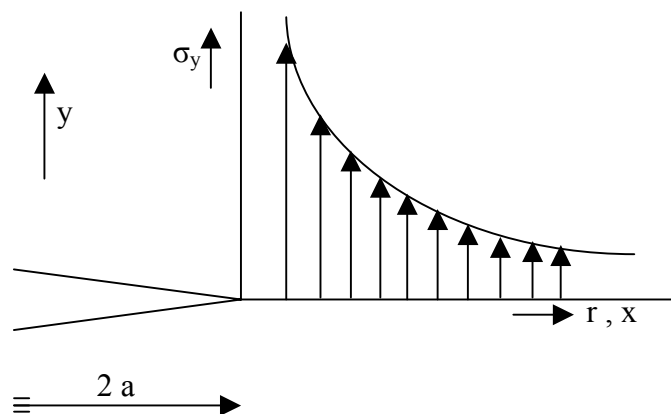


Figura 3.11 - Distribuição teórica das tensões na ponta da trinca

Ao aplicar o carregamento cíclico, mesmo com baixos níveis de tensão na estrutura, as deformações plásticas podem produzir aumento da trinca. Muitos modelos existem para explicar o crescimento de trincas. A Figura 3.12 apresenta uma ilustração do aumento de

uma trinca em materiais dúcteis com a ação de carga cíclica. No caso de materiais frágeis, a fratura acontece por fissuração via clivagem (formação de linhas preferenciais de ruptura), que ocorre devido à quebra das forças de coesão na estrutura cristalina do material e também por escoamento plástico do material (Babu et al., 2005). Para maiores detalhes ver referências Broek (1988) e Felbeck (1971).

A importância prática da fadiga cíclica está, portanto, relacionada às particularidades das tensões existentes na ponta da trinca e que são estudadas na Mecânica da Fratura. A fadiga cíclica pode ocorrer sob tensões inferiores em relação ao limite estático de resistência do material. Os ensaios experimentais de vida estrutural sob carregamento periódico são de particular interesse para caracterizar a vida útil de uma amostra de um material, em relação à fadiga por propagação da fratura. Este assunto é abordado a seguir.

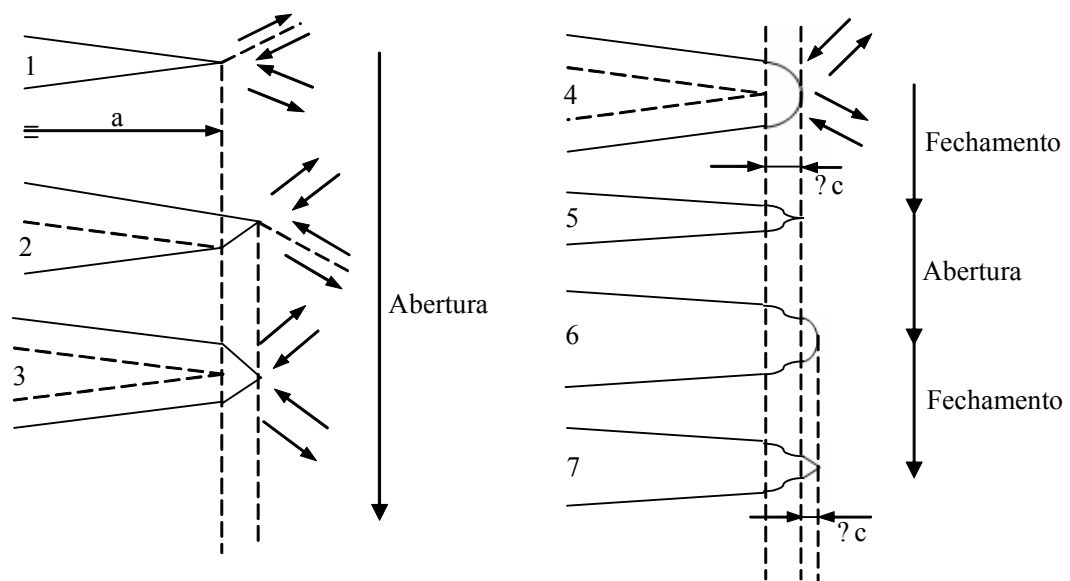


Figura 3.12 - Propagação da trinca ou fissura por deslizamento plástico

3.4.2 – Caracterização Prática da Fadiga – Curva S-N

Os estudos iniciais efetuados por Wöhler, entre 1858 e 1860 (Garcia et al, 2000), foram realizados em componentes estruturais sujeitos à flexão, torção e carregamentos axiais. Estes estudos permitiram concluir que a vida à fadiga aumenta com a diminuição da intensidade 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 resulta a caracterização

do comportamento à fadiga em termos de amplitude de tensão versus vida à fadiga, e tem origem a uma curva clássica para caracterização da fadiga nos materiais, a chamada “curva S-N”. Tal curva relaciona um valor de tensão alternada (tensão cíclica, aqui designada, simplesmente, pela letra S) ao número de ciclos (N) que pode levar a peça, sob ensaio, à ruptura. A curva S-N é também denominada “*curva de fadiga*”.

Para conhecer o comportamento de uma peça à fadiga, precisamos definir o tipo de carregamento, a frequência de variação deste carregamento, a razão entre os carregamentos máximos e mínimos. Um carregamento senoidal é comumente usado em ensaios de fadiga para a obtenção da curva S-N.

Na Figura 3.13, mostra-se um carregamento cíclico típico, idealizado como um carregamento senoidal. S_m é o valor da tensão média, a amplitude do carregamento é S_a e a variação de tensão é abreviada por ΔS ou, simplesmente, S. A razão entre tensão mínima e máxima é o coeficiente R .

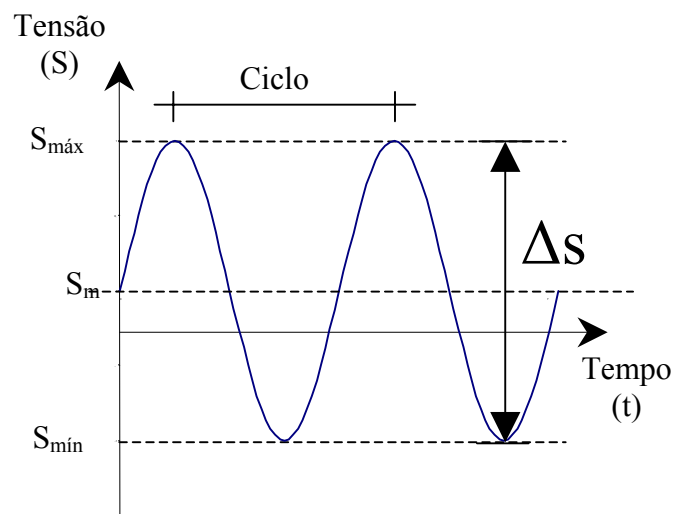


Figura 3.13 - Carregamento Senoidal

Em termos de equações, podemos escrever:

$$S_m = \left(\frac{S_{máx} + S_{mín}}{2} \right) \quad (3.24)$$

$$S_a = \left(\frac{S_{\text{máx}} - S_{\text{mín}}}{2} \right) \quad (3.25)$$

$$\Delta S = S_{\text{máx}} - S_{\text{mín}} = S \quad (3.26)$$

$$R = \left(\frac{S_{\text{mín}}}{S_{\text{máx}}} \right) \quad (3.27)$$

As propriedades dos materiais sujeitos à fadiga podem ser determinadas por ensaios de laboratório. A forma usual de apresentação dos resultados do ensaio de fadiga é pela curva S-N ou curva de Wöhler, em que se levanta o gráfico da tensão alternada ($\Delta S = S$) contra o número de ciclos (N) necessários para que ocorra a fratura. No gráfico, normalmente, emprega-se uma escala logarítmica para o número de ciclos (N) que, geralmente, está no eixo das abscissas, enquanto que, a tensão alternada (S) é lançada, no gráfico, no eixo das ordenadas, como mostra a Figura 3.14.

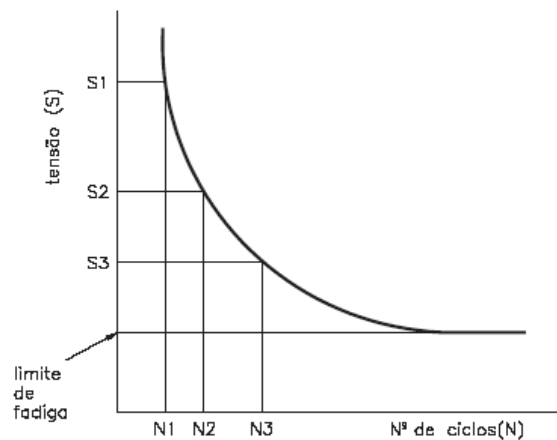


Figura 3.14 - Curva S-N ou curva de Wöhler para avaliação do ciclo de vida

Observando a curva da Figura 3.14, nota-se que, à medida que se diminui a variação S da tensão aplicada, o corpo de prova resiste a um maior número de ciclos. Diminuindo a tensão a partir de certo nível, a curva torna-se assintótica e o número de ciclos para o rompimento do corpo de prova torna-se, praticamente, infinito. A tensão alternada que não provoca mais a fratura por fadiga, chama-se “limite de fadiga” ou “resistência à fadiga” do material considerado – aqui chamada de S_{Rf} .

Portanto, na Figura 3.14, para cada nível de tensão alternada existe um número de ciclos que, quando atingido, leva a estrutura ao colapso por fadiga. Como explicado anteriormente, a cada ciclo, as trincas ou fissuras aumentam, o que significa dizer que, mesmo não se atingindo o número de ciclos, a estrutura fica debilitada. Se o número de ciclos não for atingido, a estrutura não rompe, mas o dano provocado na estrutura sob aquele número de ciclos deve ser computado. Para isso, deve-se adotar um critério de acumulação de danos.

3.4.3 – Teoria de Acumulação de Danos

Existem diversos métodos para se computar o dano acumulado de uma estrutura para diferentes níveis de tensão alternada e diferentes ciclos de tensão. Teorias de danos lineares e não lineares estão, facilmente, disponíveis na literatura especializada (Pastoukhov e Voorwald, 1995; Broek, 1988; Colins, 1993). Entretanto, a teoria linear é rotineiramente usada em práticas da engenharia civil, pois é fácil de entender, de aplicar e produz resultados satisfatórios. A primeira regra para o cálculo de danos lineares foi proposta por Palmgren, em 1924 e, desenvolvida por Miner, em 1945 (Colins, 1993). Essa regra é conhecida como a regra Palmgren-Miner e 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 naquela variação de tensão. O dano total de todos os níveis de variação de tensão que são aplicados na peça é, naturalmente, a soma de todas essas ocorrências. Isto pode ser escrito na forma da inequação seguinte, ou seja:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (3.28)$$

onde: n_i = número de ciclos que acontece no nível de variação de tensão S_i ; N_i = número de ciclos que causaria falha por fadiga, caso a peça estivesse sob tensão S_i .

Na Equação 3.28, se em vez de uma única tensão alternada σ durante n ciclos, tivermos uma peça sujeita à σ_1 durante n_1 ciclos, σ_2 durante n_2 ciclos, e assim sucessivamente, então as frações parciais n_1/N_1 , n_2/N_2 , etc. devem ser somadas. Ainda referente à mesma

equação, para uma soma total menor que 1, a peça não apresenta ruptura por fadiga, mas quando a soma alcançar ou superar a unidade, há risco de ruptura do material por fadiga.

3.4.4 – Fadiga em Sistemas de Revestimento

Conforme já comentado no Capítulo 2, este assunto ainda é pouco abordado na literatura, o que é uma indicação de que o assunto ainda é novo na comunidade científica e carece de estudos mais aprofundados. Portanto, não há ainda uma metodologia, como existe para o aço e para o concreto, entre outros materiais, que possa ser empregada com segurança para o estudo da fadiga, quando se trata de materiais no sistema de revestimento cerâmico.

Entretanto, os sistemas de revestimento em questão neste trabalho são constituídos de materiais frágeis, tais como: substrato em concreto ou em alvenaria, emboço em argamassa industrializada, argamassa colante, rejunte e cerâmica. Todos são materiais com comportamento frágil. Dos materiais frágeis usados na engenharia, o que é mais estudado, pela versatilidade, é o concreto - seja ele concreto puro ou armado ou, ainda, protendido.

Geralmente, os materiais dúcteis como o aço, seguem uma curva de resistência típica - como, por exemplo, a curva de Von-Mises (Shigley e Mischke, 2004), onde a resistência é igual, seja para a compressão pura, seja para a tração pura. A Figura 3.15a, apresenta uma curva de Von-Mises para um estado plano de tensão (estado mais fácil de ser visualizado), onde σ_1 e σ_2 são tensões principais e f_y é a tensão de escoamento (também poderia ser a tensão de ruptura igual à tração ou à compressão). Já os materiais frágeis seguem a curva de Coulomb-Mohr (Shigley e Mischke, 2004), onde se evidencia uma diferenciação de resistência quando o material está sob tração pura (f_{tk}) ou compressão pura (f_{ck}). Para as curvas de ruptura expressas em termos de tensão principal, esta 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) podem ser determinadas por:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2} \quad (3.29)$$

e

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2} \quad (3.30)$$

Neste trabalho adota-se o critério de Coulomb-Mohr para materiais frágeis conforme mostra a Figura 3.15b. Outros critérios ou curvas associadas podem ser também adotados (Kupfer et al., 1969; Willam e Wanke, 1974) – para uma revisão (Babu et al, 2005).

Definido um critério ou uma curva de ruptura a se seguir, se um ponto (num estado plano de tensão) tem componentes de tensão principal (σ_1 ; σ_2) que cai dentro ou sobre as curvas de resistência adotadas, então não há risco de colapso da estrutura; se cair fora das curvas, então há risco de colapso – ver Figura 3.15a e b.

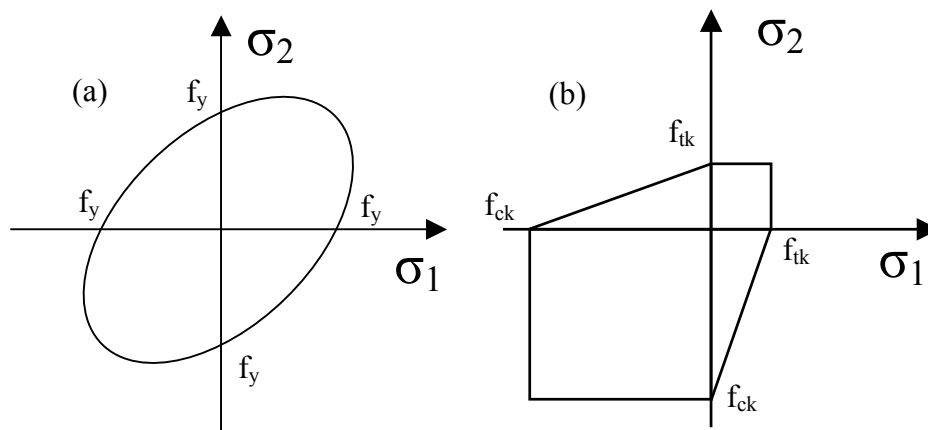


Figura 3.15 - (a) Curva de Von-Mises para materiais dúcteis, (b) Curva de Coulomb-Mohr para materiais frágeis

Na fadiga, com o passar dos ciclos de cargas, a resistência (ou curva de resistência) cai, isto é, vai progressivamente diminuindo (a curva de resistência vai encolhendo). De forma similar ao que ocorre com os aços, também para a argamassa (ou para materiais frágeis) se pode adotar este tipo de comportamento. Neste caso, a curva de resistência usada deve ser uma curva apropriada para materiais frágeis. Cada material dúctil ou frágil segue determinadas curvas características de resistência. Para a fadiga, a diminuição gradativamente da resistência, com o passar dos ciclos de carga, pode ser representada pela Figura 3.16 – que ilustra este comportamento de encolhimento da curva de resistência para materiais frágeis, como o concreto ou aqui neste trabalho adotado para a argamassa.

Na Figura 3.16, haverá ruptura ou não de um material frágil, respectivamente, se o ponto $(\sigma_1; \sigma_2)$ cai dentro ou fora das curvas de resistência (para um determinado número de ciclos “ $n=i$ ”). Quando há tensões combinadas (exemplo, estados de tensão bi ou tridimensional) com componentes normais e de cisalhamento.

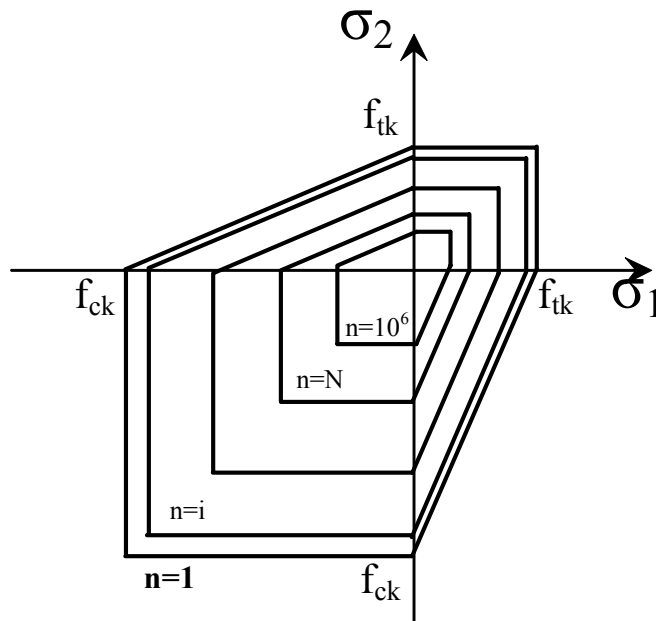


Figura 3.16 - Curvas de resistência para material frágil durante os ciclos de carga

Definido um critério de ruptura para a fadiga, a questão passa a ser a obtenção de como ocorre à diminuição das resistências à tração (f_{tk}) e à compressão (f_{ck}), com o passar dos ciclos de carga. Entretanto, isso poderá ser feito, experimentalmente, via curvas S-N de Wöhler, utilizando-se testes seja com tensões alternadas à tração, bem como, à compressão. Devido às não linearidades da mecânica da fratura que, progressivamente, tem sido incorporada no estudo do concreto à fadiga, nos últimos anos, os pesquisadores têm preferido levantar a curva S-N para o concreto sob tração (Lee e Barr, 2004).

Mais uma vez observando o concreto, existem estudos sobre fadiga à compressão e à tração. Cerro (2004) apresenta uma ampla revisão das curvas de fadiga levantadas para o concreto, conforme mencionado na revisão bibliográfica desta pesquisa. Entre os trabalhos mencionados, destaca-se o artigo de Tepfers e Kutti (1979) onde um modelo à fadiga a compressão foi desenvolvida. Posteriormente, os autores verificaram, por meio de análise estatística, que a mesma expressão poderia ser aplicada, também, para ensaios à fadiga em tração. Portanto, a mesma expressão usada para fadiga do concreto à compressão poderia

ser também, aplicada para ensaios do concreto à tração. A expressão obtida por Tepfers e Kutti (1979) e citada por Cervo (2004) é:

$$\frac{S}{f} = 1 - 0,0685(1 - R)\log N \quad (3.31)$$

onde: S é a tensão máxima alternada; f é a resistência estática à compressão pura (f_{ck}) ou à tração pura (f_{tk}) do concreto; N é o número de ciclos à fadiga; e R, é a relação definida na Equação 3.27 entre a tensão mínima e máxima aplicadas no ensaio ($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$).

Da Equação 3.31, 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 simples, isto é, estático, e assume os valores $S=f_{ck}$ ou $S=f_{tk}$, dependendo, respectivamente, se a peça de concreto está sob teste de compressão ou de tração.

Portanto, com base nos fundamentos acima apresentados podemos assumir 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) deduzida uma curva de fadiga com ensaios à tração, pode-se passar para uma curva de fadiga à compressão (e vice-versa); (c) para diferentes resistências (à tração e à compressão), uma curva de fadiga difere da outra por um fator $\eta = f_{ck}/f_{tk}$; (d) o mesmo fator (η) se aplica à tensão de resistência à fadiga (S_r) sob tração (S_{rt}) ou compressão (S_{rc}), ou seja, $S_{rc} = \eta S_{rt}$. Portanto, as curvas a serem adotadas nesta pesquisa para argamassa estão representadas na Figura 3.17.

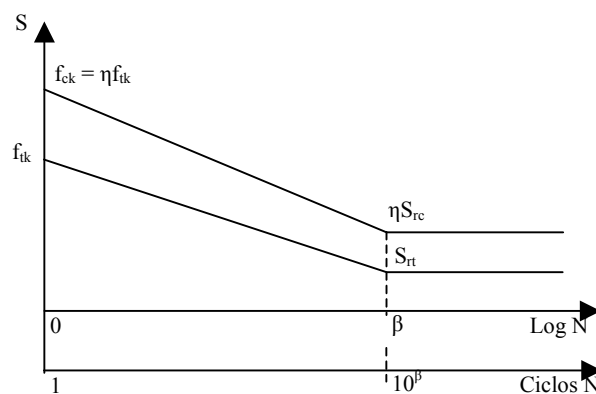


Figura 3.17 – Curvas S-N adotadas para argamassa

4 – ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 – INTRODUÇÃO

O sistema de revestimento cerâmico é um conjunto de materiais distintos que funcionam como uma única estrutura. Esses materiais possuem composições e características físicas e mecânicas diversas. Sob solicitações de carregamento, como vento, temperatura, chuvas, etc., tais materiais reagem apresentando estados de tensão diferentes que, no entanto, devem estar em equilíbrio e inferiores às respectivas resistências últimas - sob pena de produzirem fissuras locais e comprometerem o sistema de revestimento cerâmico como um todo. A proposta deste trabalho compreende a concepção de um modelo numérico em elementos finitos para o conhecimento das tensões e deformações atuantes no sistema de revestimento quando sob transientes térmicos e, posterior avaliação da resistência à fadiga focada no comportamento da argamassa de emboço. Para tanto, faz-se necessário o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas necessárias para o modelo numérico e, também, o conhecimento da curva S-N, de Wöhler, para a argamassa.

Portanto, neste capítulo, as propriedades mecânicas dos diversos materiais envolvidos no sistema de revestimento cerâmico são caracterizadas. De forma original, apresenta-se a metodologia para o ensaio à fadiga da argamassa sob tração e a obtenção da curva S-N para a argamassa de emboço e sua extensão para a fadiga da argamassa sob compressão.

4.2 – ENSAIOS ESTÁTICOS NA ARGAMASSA

Nesta pesquisa foi utilizada a argamassa “Votomassa” de múltiplo uso, mostrada na Figura 4.1 ainda em sua embalagem. Essa argamassa é fabricada de acordo com a Norma NBR 13281 (ABNT, 2005). Esse material é amplamente usado devido ao seu fácil manuseio e grande produtividade na execução de emboço e revestimento interno e externo. Ela é adequada para o assentamento de tijolos, revestimento interno e externo de paredes e uso em alvenaria estrutural. Segundo especificação na embalagem do material, esta argamassa possui resistência à compressão de até 5MPa. Para aplicação desta argamassa em áreas externas, é necessária a aplicação prévia de chapisco na superfície a receber a argamassa, a fim de aumentar a aderência.

O traço da argamassa usada obedece a relação de 50kg de argamassa para 8 litros de água, conforme especificação do rótulo da embalagem da argamassa. A mistura foi feita com uma betoneira de 360 litros e o tempo de preparo de 90 segundos para todos os corpos-de-prova, de forma a controlar o ar incorporado do aditivo da argamassa.

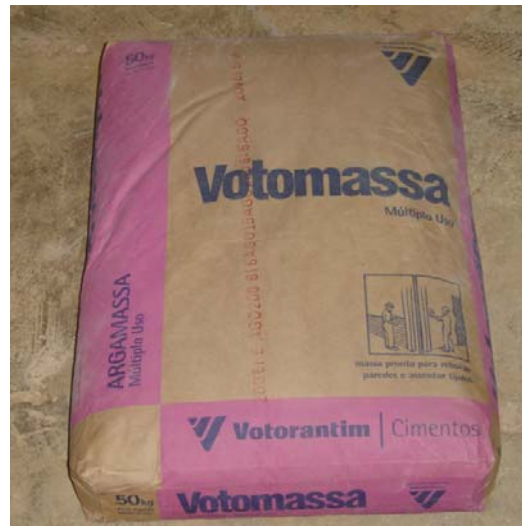


Figura 4.1 – Argamassa utilizada

4.2.1 – Propriedade e característica da argamassa

As propriedades físicas e mecânicas da argamassa devem satisfazer requisitos estabelecidos na Norma NBR 13281 (ABNT, 2005). Para o escopo deste trabalho, apenas as propriedades relacionadas abaixo foram identificadas:

- Teor de ar incorporado;
- Resistência à deformação da argamassa;
- Resistência à tração;
- Resistência à compressão;
- Módulo de deformação.

Antes de relatar os resultados dos ensaios, é importante observar que no modelo numérico, o teor de ar incorporado e a consistência à penetração do cone não são propriedades requisitadas. Entretanto, estas duas propriedades são de grande significado para a qualidade da resistência da argamassa. O teor de ar incorporado deve estar dentro da faixa especificada pela Norma NBR 13281 (ABNT, 2005), caso contrário, pode

haver ocorrências de fissuras por retração plástica logo após a aplicação da argamassa, devido a grande evaporação da água e, conseqüentemente, haverá perda de resistência à tração e à compressão e, também, prejuízo na aderência ao substrato devido ao aumento de vazios. Já o teste de consistência é fundamental para se conhecer a relação água/aglomerante ideal a ser obtida e, desta forma, se obter a plasticidade que influencia na trabalhabilidade da argamassa a se ensaiar.

4.2.2 – Determinação do Teor de Ar Incorporado

Para a determinação do teor de ar incorporado da argamassa, o ensaio foi baseado nos requisitos da Norma MERCOSUR NM 47:95 (ABNT, 1995). Para esse ensaio foi usado o aparelho da marca SOLOTEST, específico para argamassa, com capacidade de volume de um litro, como mostra a Figura 4.2a e, disponível no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da UnB.



Figura 4.2 – (a) Aparelho SOLOTEST, (b) Recipiente base, (c) Injeção de água, (d) Obtenção da pressão do ensaio e (e) Leitura do teor de ar incorporado

Para a realização desse ensaio, preenche-se um recipiente base com amostras da argamassa em três camadas de igual volume (Figura 4.2b). Adensa-se a argamassa através da aplicação de 25 golpes verticais, uniformemente distribuídos em cada camada, com uma barra lisa de 15mm de diâmetro e extremidades semi-esféricas (Figura 4.2b). Depois de rasar o excesso de argamassa com uma régua, acopla-se a tampa sobre o recipiente base. Mantêm-se as torneiras laterais abertas - Figura 4.2c. Com a seringa, injeta-se água através da torneira à esquerda até que todo o ar seja expelido pela torneira à direita. Com uma bomba (Figura 4.2d), aplica-se pressão até o início da “pressão inicial”, marcada ao se calibrar o equipamento e, procede-se à verificação se todas as saídas estão, completamente, fechadas. Em seguida, pressiona-se a alavanca que transfere a pressão para o recipiente base, mantendo-a pressionada por alguns segundos. Quando o ponteiro se estabilizar (Figura 4.2e), pode-se ler diretamente no manômetro, o teor de ar incorporado na argamassa. Os resultados dos ensaios estão relatados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Porcentagem de ar incorporado na argamassa

Amostra	Ar Incorporado (%)
1	15,0
2	16,0
3	15,5
4	16,0
5	16,0
6	16,0
7	15,5
8	14,5
9	16,5
10	14,0
11	15,0
Valor Médio = 15,5	

4.2.3 – Resistência à Deformação da Argamassa

Nesse ensaio, a resistência à deformação da argamassa é determinada através da resistência de penetração de um cone metálico de massa padronizada. Utilizou-se como referência, na realização desse ensaio, a Norma BS 1377/75 – Cone Penetrometer Method (BSI, 1975). Depois de preparada, a argamassa é colocada em um recipiente cilíndrico de PVC, cujas dimensões são 75mm de diâmetro e 60mm de profundidade. A colocação se dá em três camadas, sendo aplicados 20 golpes em cada camada até a borda do recipiente, e por fim, raspa-se o topo do cilindro. Coloca-se o cone rente à superfície do cilindro, efetuando-se a

leitura inicial. Em seguida, libera-se o cone para que ocorra a penetração pela ação da gravidade. Cessada a penetração, efetua-se a leitura final. A diferença entre a leitura final e a inicial determina a consistência do material. O resultado do ensaio é expresso em “mm” e está apresentado na Tabela 4.2. O equipamento para realização do ensaio é mostrado nas Figuras 4.3 e, encontra-se disponível no Laboratório LEM da UnB.

Tabela 4.2 – Consistência da argamassa

Amostra	1° Leitura (cm)	2° Leitura (cm)	3° Leitura (cm)
1	4,30	3,60	4,70
2	4,40	4,40	4,40
3	4,30	4,40	4,60
4	3,50	3,90	4,10
5	4,70	4,60	4,70
6	4,00	4,30	4,10
7	4,50	4,30	4,60
8	4,10	4,00	4,30
9	3,90	4,00	3,70
10	4,30	4,70	4,40
11	4,20	4,20	3,90



Figura 4.3 – Detalhes do equipamento para o ensaio de penetração do cone

4.2.4 – Determinação da Resistência à Tração na Flexão

Para este ensaio foram utilizados corpos-de-prova (CP) com a mistura da argamassa seguindo os requisitos da Norma NBR 13276 (ABNT, 2005) para argamassa industrializada. Os corpos-de-prova foram moldados em moldes de quatro compartimentos, de forma a possibilitar a preparação simultânea de oito corpos-de-prova,

com seção transversal de 40mm x 40mm e 160mm de comprimento. Logo após o término das moldagens, os corpos-de-prova foram cobertos com placas de vidro para evitar a perda de água e, ficaram mantidos à temperatura ambiente durante 28 dias. Em seguida foram desmoldados para o ensaio de resistência à tração na flexão.

Os ensaios para a determinação da resistência à tração na flexão foram realizados, conforme as recomendações da Norma NBR 13279 (ABNT, 2005). Para este ensaio foi utilizada a prensa manual mostrada na Figura 4.4a e, disponível no Laboratório LEM da UnB.

O ensaio consiste na aplicação de uma carga centrada sobre o corpo-de-prova bi apoiado (Figura 4.5), rompendo-o à flexão. Sua resistência à tração na flexão é determinada através da Equação 4.1. A Figura 4.4b ilustra detalhes do ensaio. O resultado encontra-se na Tabela 4.3.

$$R_f = \frac{1,5F_f}{1600} \quad (4.1)$$

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; e L , é a distância entre os suportes, em mm.

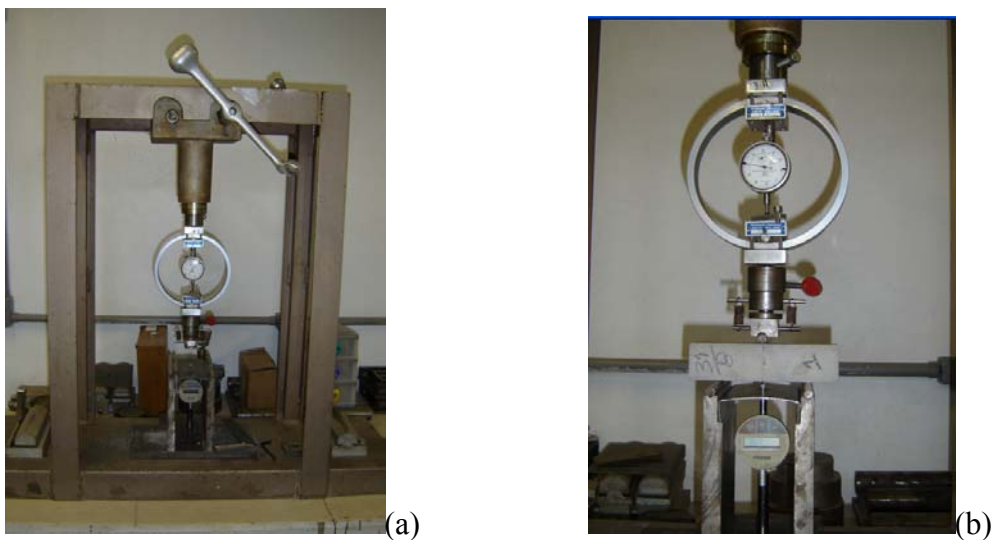


Figura 4.4 (a) – Prensa manual (b) Detalhe do ensaio de tração à flexão

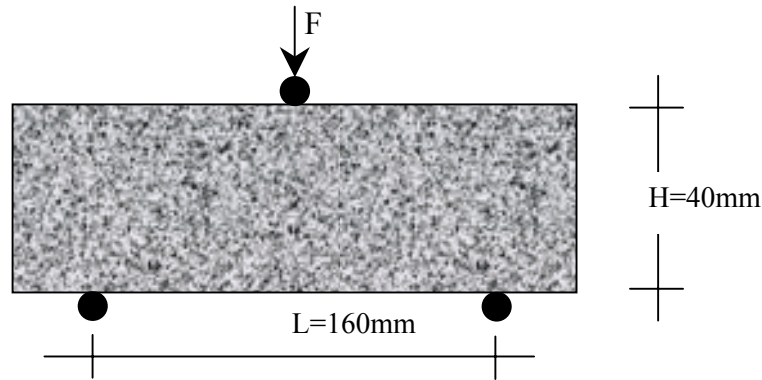


Figura 4.5 – Esquema de carga para determinação da resistência à tração na flexão

Tabela 4.3 – Resistência da argamassa à tração na flexão

CP	Resistência à Tração na Flexão (MPa)
1	1,67
2	1,63
3	1,51
4	1,74
5	1,52
6	1,75
Valor Médio = 1,640	

4.2.5 – Determinação da Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão baseou-se nas especificações da Norma NBR 13279 (ABNT, 2005), utilizando-se metades extraídas dos corpos-de-prova usados no ensaio de tração na flexão. A norma pede para “utilizar as metades dos três corpos-de-prova de ensaio de flexão, posicionando-as no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio, de modo que a face rasada não fique em contato com o dispositivo de apoio nem com o dispositivo de carga”, como mostrado na Figura 4.6b. A determinação da resistência à compressão é calculada através da Equação 4.2. Os resultados do ensaio estão na Tabela 4.4.

$$R_c = \frac{F_c}{L^2} \quad (4.2)$$

Onde R_c = Resistência à compressão, em MPa; F_c = Carga máxima aplicada, em N; o valor “ L^2 ” é a área da seção quadrada do dispositivo de carga 40mmx40mm, em mm^2 .

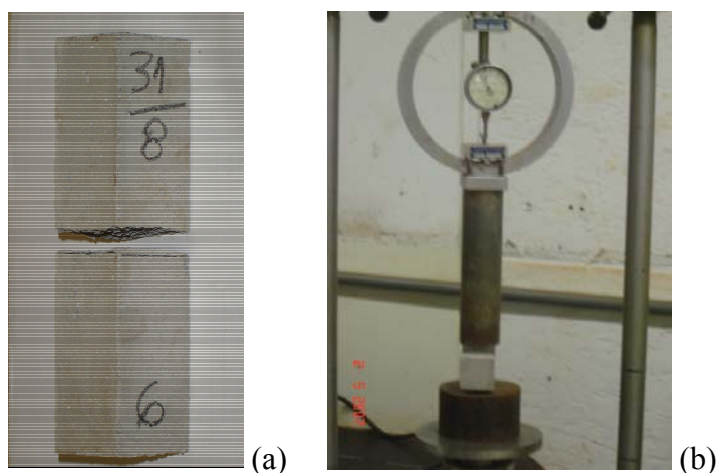


Figura 4.6 – (a) CP rompido à Flexão. (b) Ensaio à compressão

Tabela 4.4 – Resistência à compressão

CP	Compressão Axial (MPa)
1	4,06
2	4,59
3	4,51
4	4,00
Valor Médio = 4,29	

4.2.6 – Determinação do Módulo de Deformação

O ensaio de determinação do módulo de deformação da argamassa foi adaptado da Norma NBR 8522 (ABNT, 2003) do concreto. Esta norma estabelece a metodologia para a determinação do módulo estático de deformação à compressão do concreto endurecido, em corpos-de-prova cilíndricos que podem ser moldados ou extraídos da estrutura. A norma citada estabelece, ainda, como traçar o diagrama tensão versus deformação.

Para o ensaio foi utilizado um extensômetro manual para medir as deformações, sendo estas medidas feitas através de duas bases de medida, igualmente espaçadas, no perímetro da seção dos corpos-de-prova, a uma distância entre os pontos de 50mm - Figura 4.7a.

Além disso, foi utilizada, no ensaio, uma prensa manual com anel dinamométrico de 2000Kgf de capacidade máxima - Figura 4.7b. Aplica-se carga em intervalos de 100kgf, e quando atingido a força final aplicada, é feita a leitura com o extensômetro para se medir

as deformações do corpo-de-prova (Figura 4.7c). A Tabela 4.5 mostra os valores obtidos para o módulo de deformação para os quatro corpos-de-prova ensaiados. A Figura 4.8 apresenta o diagrama tensão versus deformação da argamassa de emboço obtido para o primeiro corpo-de-prova. Este tipo de gráfico se repete, tipicamente, para os outros corpos-de-prova ensaiados. Para exemplificar a obtenção de um valor do módulo de deformação, considere a linha reta da Figura 4.8, cujo coeficiente é 5,645 (no caso, 5,645GPa). A Tabela 4.5 mostra este e outros valores resultantes dos quatro ensaios do módulo de deformação.

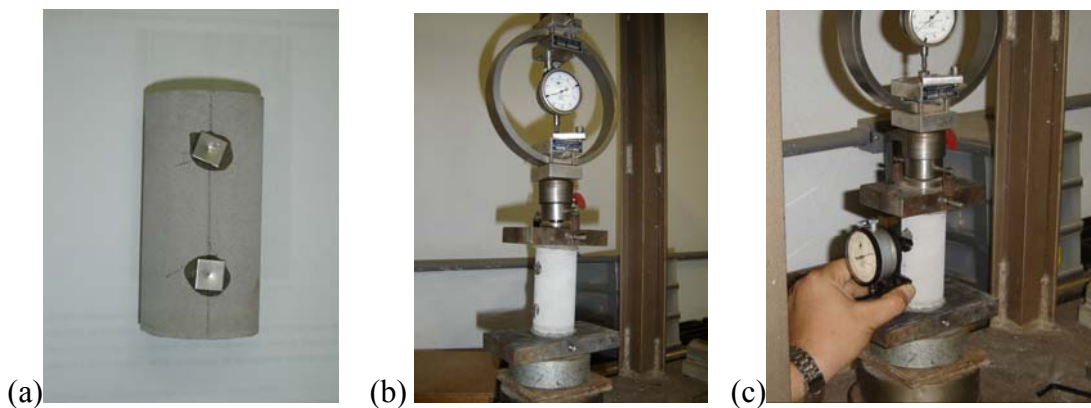


Figura 4.7 – (a) corpo-de-prova para determinação do módulo de deformação. (b) Posicionamento na prensa. (c) Leitura da deformação do corpo-de-prova

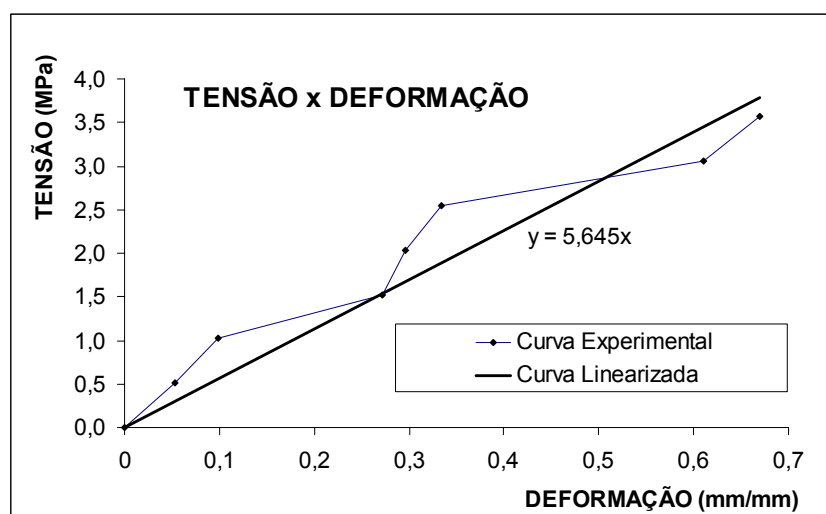


Figura 4.8 – Diagrama tensão versus deformação típico de ensaio de um corpo-de-prova para a determinação do módulo de deformação da argamassa

Tabela 4.5 – Ensaio do módulo de deformação da argamassa de emboço

CP	Módulo de Deformação em (GPa)
1	5,645
2	5,335
3	5,355
4	5,662
Valor Médio = 5,49	

4.3 – ENSAIOS DA ARGAMASSA À FADIGA

Conforme já explicado no item 4.2, no início deste capítulo, a argamassa “Votomassa” de múltiplo uso foi empregada nesta pesquisa. A Figura 4.1 mostra a argamassa industrializada ainda dentro da embalagem comercial. Por se tratar de uma pesquisa pioneira no assunto fadiga de argamassa, nada se encontrou na literatura a respeito de estudo desta argamassa em condições de fadiga, nem tampouco, foram encontradas recomendações sobre padronização de ensaios à fadiga para argamassas industrializadas.

Coube a esta pesquisa propor um tipo de ensaio que pudesse capturar o comportamento à fadiga da argamassa industrializada, a fim de se fazer a avaliação do comportamento da argamassa no sistema de revestimento, quando sob carregamento repetitivo.

4.3.1 – O Ensaio à Fadiga e o Equipamento usado

De forma genérica, o ensaio de fadiga consiste em aplicar uma carga cíclica em um corpo-de-prova com o objetivo de se medir quantos ciclos o corpo-de-prova resiste antes de romper por fadiga. Com isso, obtém-se a Curva de Wöhler ou Curva S-N. O ensaio de fadiga também é capaz de fornecer um valor de tensão característica de cada material, abaixo da qual o corpo-de-prova daquele material não mais se rompe. Os principais resultados do ensaio são:

- Limite de Resistência à Fadiga (σ_{Rf}), ou seja, o valor de tensão alternada abaixo do qual um corpo-de-prova não sofre ruptura por fadiga;
- Vida em fadiga (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} .

Os ensaios de fadiga podem ser à tração, à compressão, ou em estados de tensão variando entre tração e compressão. Como ainda não existe procedimento elaborado para o ensaio específico da fadiga de argamassas, este trabalho se inspirou nos ensaios feitos para o concreto que é um material frágil como a argamassa, mas já bem estudado quanto à fadiga.

Num estudo de revisão sobre o comportamento à fadiga do concreto, Lee e Barr (2004) destacam que para o concreto é comum fazer ensaios à compressão pura. Entretanto, ainda segundo os autores, “nos últimos anos, tem havido maior interesse nas características da fadiga do concreto sob tração, especialmente depois da introdução da mecânica da fratura não-linear nas análises do concreto”. Com isso, e tendo presente os trabalhos de Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979), sobre o paralelismo entre curvas do concreto à fadiga em ensaios à tração e à compressão, optou-se por fazer ensaios de tração na argamassa.

Portanto, a curva S-N dos testes de fadiga apresentados neste trabalho são para ensaios de tração e, posteriormente, estendidos para estado de tensão à compressão. Para a fadiga à tração, utilizou-se a máquina de ensaio universal MTS 810 – Figura 4.9. O ensaio pode ser operado com controle de força ou de deslocamento. Optou-se pelo controle de força que resulta em tensão alternada de amplitude constante ao longo do teste.

O equipamento MTS 810 é controlado por um computador e, através deste, se ativa a bomba e o atuador hidráulico para que se efetue o teste - ver Figura 4.10. As garras de fixação dos corpos-de-prova também são acionadas hidráulicamente, de maneira que se pode variar a pressão nas mesmas. O MTS 810 ainda possui uma célula de carga que mede a força aplicada aos corpos-de-prova, em uma faixa que varia de 1KN a 100KN.

4.3.2 – Dimensionamento do Corpo-de-Prova

Inicialmente, foram confeccionados corpos-de-prova exploratórios, moldados em função da faixa de variação da intensidade de carga do equipamento utilizado para o ensaio à fadiga, que vai de 1kN a 100kN. Nestes ensaios exploratórios usaram-se corpos-de-prova com entalhes a fim de se propiciar o aparecimento de tensões máximas na região do entalhe e, posterior ruptura do corpo-de-prova em região conhecida e predeterminada. Nestes entalhes, a tensão atinge valores de pico bem superiores à tensão média,

propiciando a ruptura. Na região do entalhe calcula-se um fator de concentração de tensão K_t que amplificará a tensão média. Este fator é definido na Equação 4.3.



Figura 4.9 – Equipamento MTS 810 usado no ensaio de fadiga

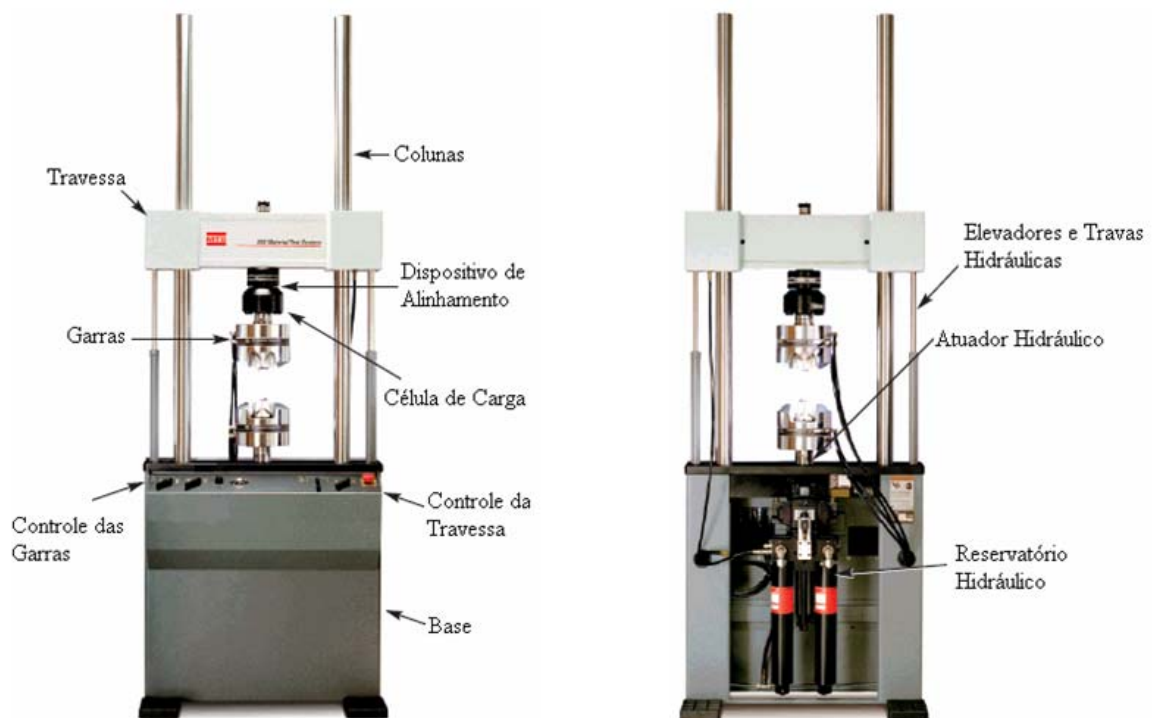


Figura 4.10 – Descrição do equipamento MTS 810 (*Material Test System*)

$$K_t = \frac{\sigma_{\text{Máx}}}{\sigma_o} \quad (4.3)$$

onde K_t é o fator de concentração de tensões; $\sigma_{Máx}$ é a tensão máxima na região do entalhe; e σ_0 é a tensão média se não houvesse entalhe. A Figura 4.11 ilustra estas tensões média (σ_0) e máxima ($\sigma_{Máx}$) na região do entalhe. O valor de K_t depende de relações geométricas de alguns parâmetros do corpo-de-prova.

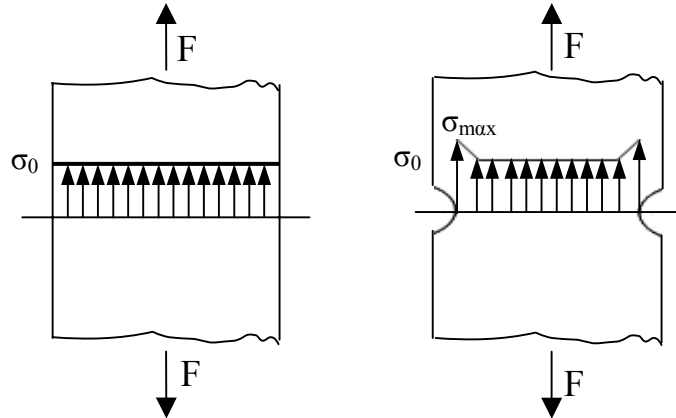


Figura 4.11 – Tensões locais em três casos de entalhe

Nos corpos-de-prova exploratórios, projetados sem muito critério, esperava-se a ruptura por fadiga na região do entalhe, mas isso não ocorreu, como demonstra as Figuras 4.12 (a) e (b). A causa foi à inesperada excentricidade entre corpo-de-prova e garra do equipamento MTS 810. A falta de alinhamento entre as duas barras de suporte fixadas nas extremidades do CP (observe a Figura 4.12) produziu, na região de acoplamento, o surgimento de esforços cisalhantes, provocando a ruptura precoce do CP fora da região do entalhe.

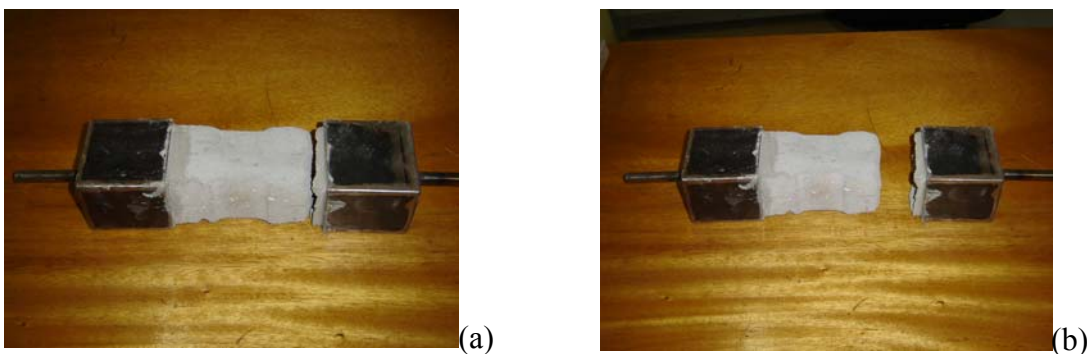


Figura 4.12 – Corpos-de-prova em (a) e (b) com ruptura precoce devido à excentricidade

Sem a obtenção dos resultados esperados, procurou-se projetar outro sistema de acoplamento dos corpos-de-prova às garras de fixação do equipamento MTS 810, a fim de se eliminar a falta de alinhamento dos apoios e, como conseqüência, o cisalhamento

indesejável. Os corpos-de-prova dos ensaios foram, também, redimensionados para apresentar menores níveis de tensão. A Figura 4.13 apresenta o esquema do novo corpo-de-prova adotado com os detalhes de fixação no equipamento MTS 810.

O cálculo e as dimensões do corpo-de-prova estão na Tabela 4.6. A tabela deve ser entendida observando-se os parâmetros definidos na Figura 4.13. Nesta tabela, a “base” corresponde à área maior A_1 e o “corpo” corresponde à área menor A_2 - ver Figura 4.13. 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 Tabela 4.3 e, vale 1,64 MPa. Com esta tensão chega-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 CP - ver ábaco da Figura 4.14. 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 4.6 resume estes valores.

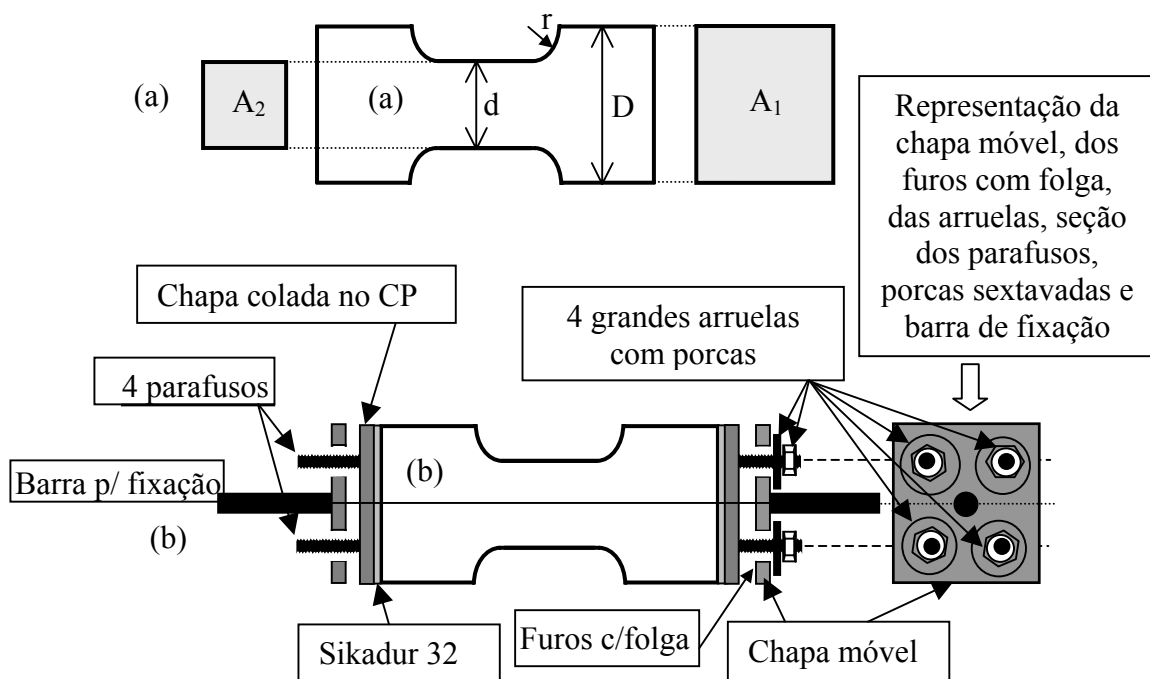


Figura 4.13: (a) Corpo-de-Prova. (b) Mecanismo de fixação na garra do MTS 810

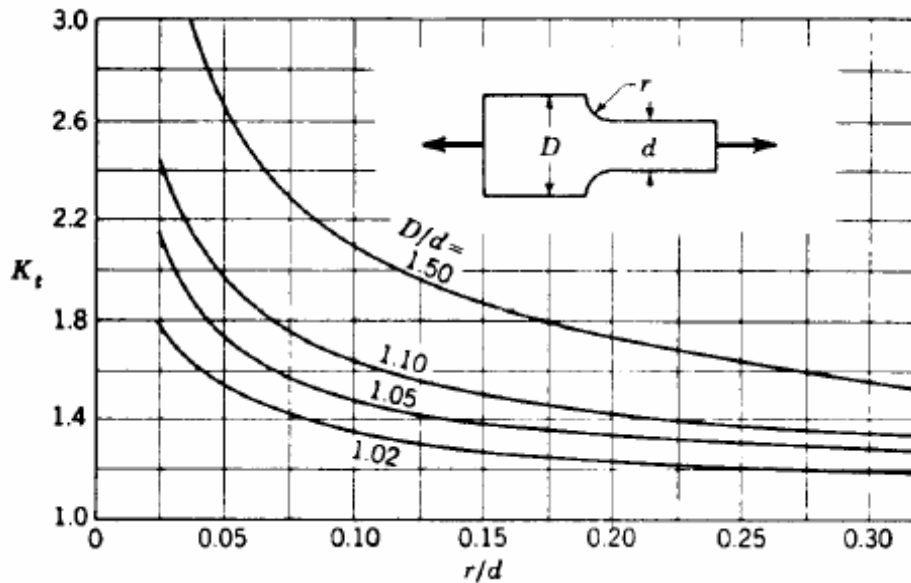


Figura 4.14 – Fator de concentração de tensão de uma barra retangular sob tração

Tabela 4.6 – Resumo dos cálculos para o CP de argamassa para o ensaio à fadiga

Cálculo do Corpo-de-Prova para o Ensaio de Fadiga							
1	BASE = DxE						
2	D=Largura	12,00	[cm]				
3	E=Espessura	12,00	[cm]				
4	CORPO = dxE						
5	r/d =	0,28	adm				
6	d = D-2r	7,74	[cm]				
7	r =	2,13	[cm]				
8	K_t - Ábaco	1,60	adm				
9	A_1 = Área Maior	144,00	[cm ²]				
10	A_2 = Área - Menor	92,90	[cm ²]				
11	TENSÕES						
12	Tensão Máx Arg em A_2 =	1,64	[MPa]	16,40	[kgf/cm ²]	0,16 [kN/cm ²]	
13	Tensão-Média em A_1 =	1,03	[MPa]	10,25	[kgf/cm ²]	0,10 [kN/cm ²]	
14	F_t = Força Ruptura em A_1	14,76	[kN]	1476,00	[kgf]	1,48 [ton]	
15	Faixa de trabalho						
16	Mín =	1,00	[kN]	100	[kgf]	0,1 [ton]	
17	Máx =	100,00	[kN]	10000	[kgf]	10 [ton]	
18	Níveis do TESTE						
19	Para o Ensaio de Fadiga					VALOR USADO	
20	$1,0*(0,8)*F_t$	11,81	[kN]	1180,80	[kgf]	1,18 [ton]	12kN
21	$0,9*(0,8)*F_t$	10,63	[kN]	1062,72	[kgf]	1,06 [ton]	10kN
22	$0,7*(0,8)*F_t$	8,27	[kN]	826,56	[kgf]	0,83 [ton]	8kN
23	$0,3*(0,8)*F_t$	5,90	[kN]	590,40	[kgf]	0,59 [ton]	6kN

O corpo-de-prova foi moldado numa forma de ferro, como mostra a Figura 4.15, sendo executado em três camadas de 4cm cada e, aplicando-se 25 golpes em cada camada.

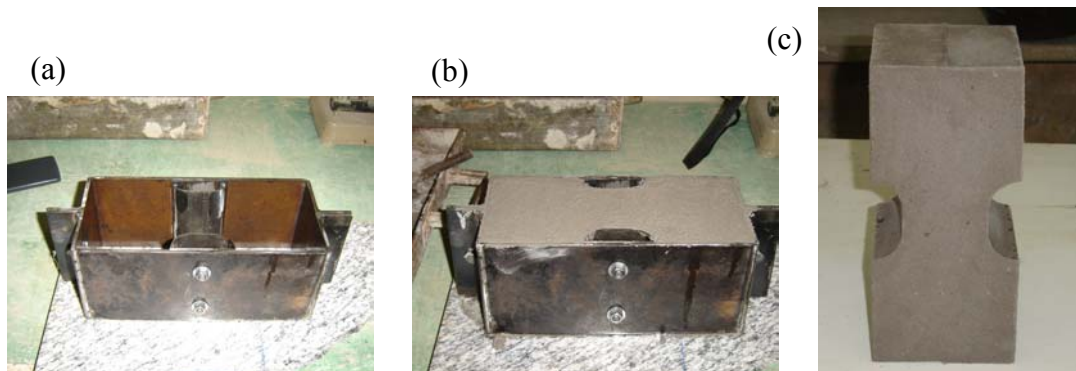


Figura 4.15 – (a) Molde do CP, em aço. (b) Moldagem do CP. (c) CP de argamassa

O procedimento de fixação do corpo-de-prova ao MTS 810 deu-se da seguinte forma: primeiro, o corpo-de-prova foi colado com Sikadur 32 numa chapa com 4 parafusos. Em seguida, utilizou-se outra chapa solta, contendo uma barra central robusta para a devida fixação do corpo-de-prova às garras do MTS 810. Esta chapa é dita móvel, pois se pode adaptar e se alinhar no equipamento, já que possui furos alargados. Desta forma, elimina-se a excentricidade indesejável do corpo-de-prova – ver Figura 4.13. A fixação do corpo-de-prova foi feita com o auxílio de robustas arruelas e porcas sextavadas. Observa-se na Figura 4.16 (a) e (b), a fixação do corpo-de-prova no equipamento MTS 810 e, após a ciclagem de carga, a ruptura do corpo-de-prova por fadiga Figura 4.16c.

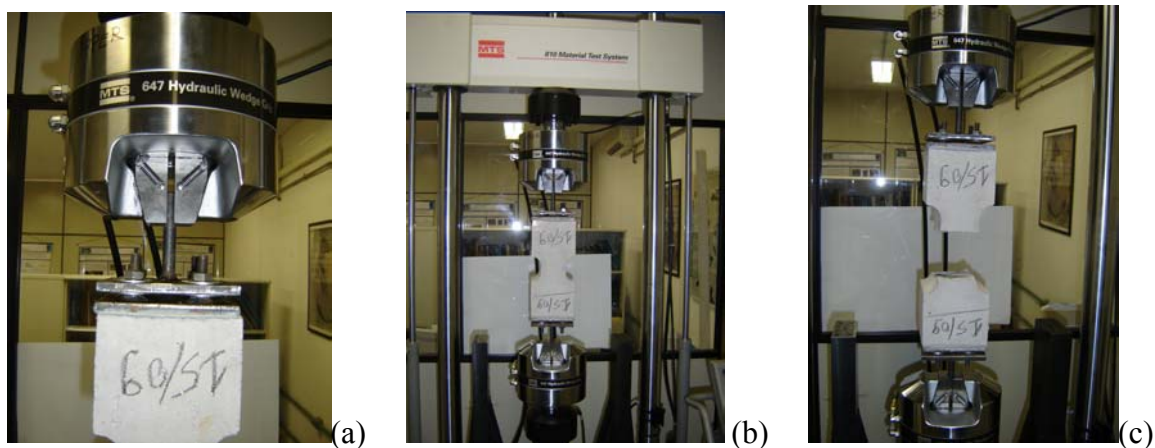


Figura 4.16 – (a) Atuador e garra. Antes (b) e depois (c) da ruptura por fadiga

4.4 – CURVAS DE WÖHLER PARA A ARGAMASSA

Seguindo as recomendações de Lee e Barr (2004) e, adotando a metodologia descrita por Cervo (2004) e baseada nos trabalhos de Tepfers e Kutti (1979) sobre o paralelismo entre curvas do concreto à fadiga em ensaios à tração e à compressão, optou-se por fazer ensaios de fadiga à tração na argamassa. Em resumo, o objetivo do ensaio que se apresenta nesta seção é determinar o quanto um conjunto de corpos-de-prova é capaz de resistir a um conjunto de esforços repetitivos de tração. Com estes dados, acha-se a curva de Wöhler para a argamassa sob tração. Subsequentemente, usando o paralelismo das curvas entre tração e compressão, acha-se, também, a curva de Wöhler para a argamassa sob compressão.

O teste é feito com um valor de tensão alternada de cada vez, até a ruptura ou a interrupção do ensaio. A tensão alternada varia de zero até o valor da tensão desejada. Portanto, o teste de fadiga à tração é caracterizado por um carregamento senoidal, com amplitude S e razão entre tensão mínima e máxima de zero, ou seja, coeficiente $R=0$ (já que a $\sigma_{\min}=0$). Os ensaios à tração no MTS 810 estão resumidos na Tabela 4.7. Nota-se nesta tabela, os valores dos níveis de tensão alternada usados: 1,29MPa, 1,08MPa, 0,86MPa, 0,65MPa e 0,55MPa que correspondem, respectivamente, aos valores de forças nas garras do equipamento de: 12kN, 10kN, 8kN e 6kN. A frequência do ensaio é de 5 ciclos por segundo.

Os ensaios de fadiga são caracterizados por uma grande dispersão dos dados em função da irregularidade da micro-estrutura que compõe o material. Devido a isso, as diretrizes para o ensaio de tração sugerem realizar, mais de um ensaio em corpos-de-prova semelhantes, para cada valor de carregamento adotado. Para os valores de tensão 1,29MPa, 1,08MPa e 0,86MPa foram realizados ensaios em três corpos-de-prova até a ruptura. Para a tensão de 0,55MPa, o ensaio teve que ser interrompido após se chegar a um número de ciclos bastante elevado, acima de $1336000 \approx 1,3 \times 10^6$ ciclos (para uma frequência de ensaio de 5 ciclos/segundo, isso equivale a 74h de ensaio) [$1336000/(5 \cdot 3600)=74$]. Também para o nível de tensão de 0,65MPa, o ensaio teve que ser interrompido após 251000 ciclos ou 14h de ensaio [$251000/(5 \cdot 3600)=14$].

A Tabela 4.7 resume os valores de tensão adotados e o número de ciclos para romper os corpos-de-prova nos ensaios à tração. Nesta mesma tabela, também se observa que, corpos-de-prova sob maior tensão se rompem com menor número de ciclos. Como alguns ensaios foram interrompidos, admite-se ainda que, corpos-de-prova sob tensão de 0,65MPa não se rompem abaixo de 2×10^5 ciclos. Portanto, 0,65MPa será considerado o valor da resistência à fadiga. Ou seja; um corpo-de-prova sob tensão alternada de tração abaixo deste limite de resistência à fadiga (no caso, 0,65MPa) suporta, em teoria, um número de ciclos maior que 2×10^5 ciclos (correspondendo a mais de 500 anos - 5 séculos de uso) [$2 \times 10^5 / 365 = 548$], ou mesmo tenha vida infinita.

Tabela 4.7 – Ensaio de fadiga da argamassa de emboço

CP	Força (kN)	Tensão (MPa)	Vida (ciclos)
1	12	1,29	18
2	12	1,29	17
3	12	1,29	39
4	10	1,08	198
5	10	1,08	240
6	10	1,08	210
7	8	0,86	35714
8	8	0,86	37482
9	8	0,86	35203
10	6	0,65	200934
11	6	0,65	251000
12	5	0,55	1336000

Admite-se, portanto, este valor como o limite de resistência à fadiga da argamassa quando sob tração. Para completar os dados sobre ensaio da argamassa, nota-se ainda que, um corpo-de-prova sob tração igual à resistência última da argamassa, ou seja, $f_{tk}=1,64\text{MPa}$ (Tabela 4.3) suporta apenas um ciclo que é o ensaio de resistência última.

A Tabela 4.7 pode também ser usada para se chegar à curva de Wöhler para a argamassa sob compressão. Neste trabalho, apenas se considera uma proporcionalidade entre as tensões de resistência à compressão e à tração nos ensaios.

Portanto, das Tabelas 4.3 e 4.4, encontramos, respectivamente, a resistência da argamassa à tração e à compressão, isto é, $f_{tk}=1,64\text{MPa}$ e $f_{ck}=4,29\text{MPa}$ e, o coeficiente $\eta=f_{ck}/f_{tk}=4,29/1,640=2,615$. Com isto, se constrói a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Pontos do ensaio de fadiga da argamassa sob tração e sob compressão

Tensão de Tração (MPa)	Fator	Correção para Tensão de Compressão (MPa)	Número de ciclos (N)	Log(N)
1,64	x2,615	4,29	1	0,00
1,29	x2,615	3,37	18	1,26
1,29	x2,615	3,37	17	1,23
1,29	x2,615	3,37	39	1,59
1,08	x2,615	2,82	198	2,30
1,08	x2,615	2,82	240	2,38
1,08	x2,615	2,82	210	2,32
0,86	x2,615	2,25	35714	4,55
0,86	x2,615	2,25	37482	4,57
0,86	x2,615	2,25	35203	4,55
0,65	x2,615	1,70	200934	5,30
0,65	x2,615	1,70	251000	5,40

A Figura 4.17 mostra os gráficos correspondentes aos dados da Tabela 4.8.

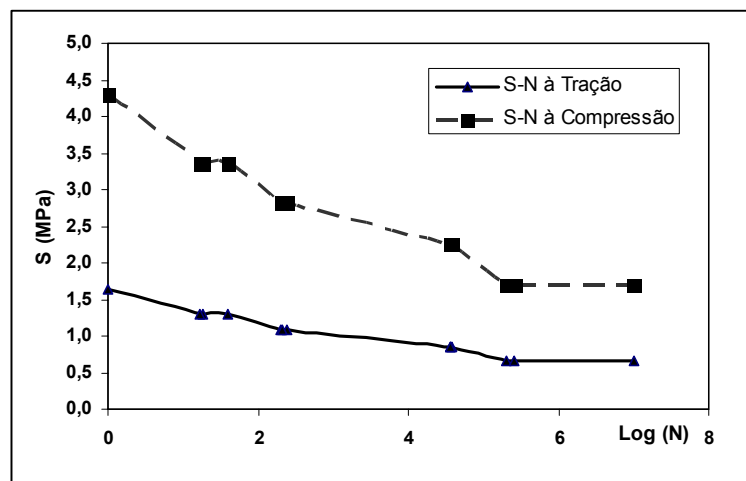


Figura 4.17 – Curvas S-N de fadiga da argamassa de emboço

As curvas S-N ou de Wöhler, apresentadas na Figura 4.17, podem ainda ser linearizadas, conforme é mostrado na Figura 4.18. Nesta figura y é a tensão alternada em MPa, x é o logaritmo decimal do número de ciclos N, S_{Rf}^t e S_{Rf}^c são, respectivamente, a resistências à fadiga num ensaio à tração e à compressão.

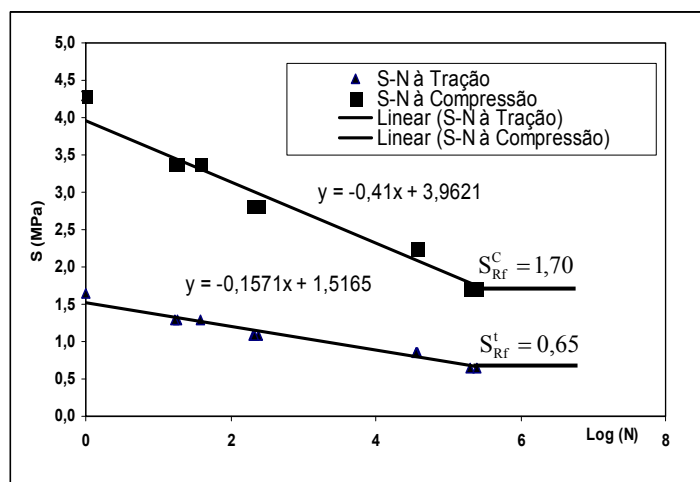


Figura 4.18 – Curvas S-N de fadiga linearizadas para a argamassa de emboço

Das curvas linearizadas da Figura 4.18, pode-se, a exemplo da Equação 3.31 sugerida por Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979), deduzir as equações para a fadiga da argamassa. Para tal, substitui-se nas equações linearizadas da Figura 4.18, “x” por “log(N)” e “y” por “S”, e na Equação 3.31, $R=0$ (já que no ensaio $\sigma_{\min}=0$). Portanto, temos:

1) Para a argamassa sob tração

$$\begin{aligned} \text{Para } N < 2 \times 10^5 \quad S &= 1,5163 - 0,157 \log(N) \\ \text{Para } N > 2 \times 10^5 \quad S &= 0,65 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (4.4)$$

2) Para a argamassa sob compressão

$$\begin{aligned} \text{Para } N < 2 \times 10^5 \quad S &= 3,9621 - 0,41 \log(N) \\ \text{Para } N > 2 \times 10^5 \quad S &= 1,70 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Para se chegar a uma equação mais genérica para a fadiga das argamassas industrializadas e não depender de valores numéricos das tensões de tração (f_{tk}) e de compressão (f_{ck}) pode-se dividir as Equações 4.4 e 4.5, respectivamente, por f_{tk} e f_{ck} da argamassa e obtemos:

1) Para a argamassa sob tração

$$\begin{aligned} \text{Para } N < 2 \times 10^5 \quad \frac{S}{f_{tk}} &= 0,925 - 0,096 \log(N) \\ \text{Para } N > 2 \times 10^5 \quad \frac{S}{f_{tk}} &= 0,396 \end{aligned} \quad (4.6)$$

2) Para a argamassa sob compressão

$$\begin{aligned} \text{Para } N < 2 \times 10^5 \quad \frac{S}{f_{ck}} &= 0,925 - 0,096 \log(N) \\ \text{Para } N > 2 \times 10^5 \quad \frac{S}{f_{ck}} &= 0,396 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Ou, de forma similar ao que foi sugerido por Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979) para o concreto e para uma relação R diferente de zero entre a tensão mínima e a máxima, num ensaio à fadiga de argamassa industrializada, teríamos:

$$\begin{aligned} \text{Para } N < 2 \times 10^5 \quad \frac{S}{f} &= 0,925 - 0,096(1 - R) \log(N) \\ \text{Para } N > 2 \times 10^5 \quad \frac{S}{f} &= 0,396 \end{aligned} \quad (4.8)$$

sendo f a tensão de resistência última à tração (f_{tk}) ou a compressão (f_{ck}) e R a razão entre tensão mínima e máxima ($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$).

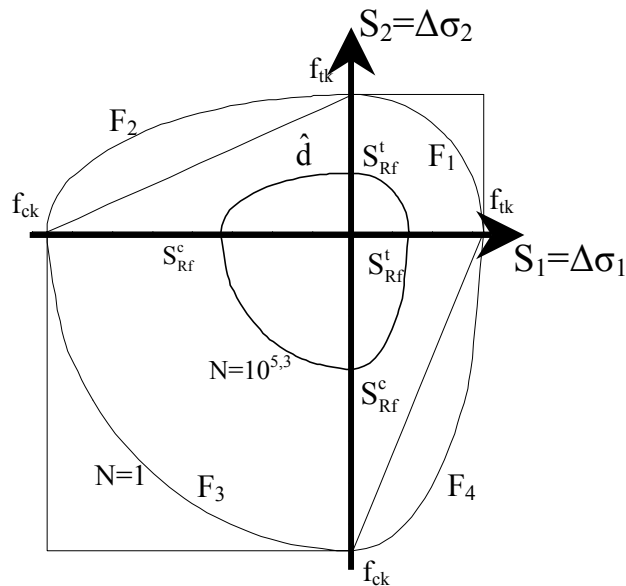


Figura 4.19 – Curvas de ruptura para avaliação da fadiga

Definidos os valores de f_{ck} e f_{tk} estáticos, e as curvas de fadiga para a redução de f_{ck} e f_{tk} com o número de ciclos (Figura 4.18), as curvas de ruptura (segundo a seção 3.44 –

Capítulo 3) à fadiga a serem usadas para esta argamassa estão na Figura 4.19. Na Figura 4.19, mostram-se as curvas fictícias para $N=1$ e para $N=10^{5,3}$, este último ($10^{5,3}$) corresponde ao número de ciclos referente a tensão de resistência a fadiga. Finalmente nota-se que para o estado de tensão de tração-compressão a curva das Equações 4.7 e 4.8 são adaptados inspirando-se no que é sugerido pela publicação da EuroLightCon (European Union, 2000) - LWA concrete under fatigue loading. A literature survey and a number of conducted fatigue tests) onde é sugerido que se deve fazer a verificação para tração ou compressão (o que for mais conservador) levando-se em conta um valor de $R < 0$ (ver Equação 4.7 e 4.8) com valores máximos e mínimos em módulo porém de sinal trocado.

5 – ANÁLISE NUMÉRICA

5.1 – INTRODUÇÃO

A análise numérica do sistema de revestimento visa estudar as tensões e deformações atuantes no sistema de revestimento, quando o mesmo estiver sendo submetido a solicitações térmicas. Com isso, pretende-se avaliar o sistema de revestimento cerâmico, em especial, a argamassa de emboço quanto ao comportamento à fadiga.

Para a definição do modelo numérico foram caracterizadas, no capítulo anterior, as propriedades da argamassa de emboço no que diz respeito a sua resistência e ao seu comportamento à fadiga. As propriedades dos demais materiais do sistema de revestimento foram extraídas da pesquisa de Saraiva (1998). Nota-se que, o trabalho de Saraiva (1998) limitava-se a uma análise estática, enquanto que, esta pesquisa faz a avaliação do sistema de revestimento quando sob transiente térmico e à fadiga.

O carregamento térmico aplicado no sistema de revestimento cerâmico gera diferentes tensões termomecânicas entre os diversos materiais das camadas que compõem o sistema de revestimento. Isso ocorre devido à diferença de temperatura entre a superfície externa da fachada e a superfície interna da edificação, bem como, da temperatura de referência (endurecimento da argamassa).

Para a simulação dessas solicitações térmicas foram consideradas as temperaturas referentes ao dia mais quente ocorrido na cidade de Brasília, registrado até hoje e datado no ano de 1963, conforme INMET (2006). Os valores das temperaturas obtidas com este carregamento térmico incidindo sobre o sistema de revestimento, são aqui aplicados ao modelo numérico simplificado adotado para a análise das tensões.

Utiliza-se, neste capítulo, uma modelação numérica de uma fachada típica adotando o método de elementos finitos (MEF), disponível no *software* ANSYS (1994).

5.2 – CONCEPÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A análise numérica nesta pesquisa baseia-se no modelo em elementos finitos (EF) definido na pesquisa de Saraiva (1998). A Figura 5.1 apresenta o modelo numérico e representa uma simulação de uma fachada de revestimento cerâmico de um prédio.

Conforme sugerido por Fiorito (1994), o posicionamento das juntas de movimentação deve ser, no máximo, de 4,90m em cada direção para revestimento cerâmico externo. Conseqüentemente, o sistema de revestimento considerado terá uma dimensão de 4,90m para ambas as direções (largura e altura).

Como se conclui da Figura 5.1, é adotado um modelo plano reduzido composto por três peças cerâmicas quadradas, rejunte, argamassa de emboço e argamassa colante. Por estar confinado, este modelo representa um estado plano de deformação. A Figura 5.2 mostra as dimensões típicas das camadas que compõem o sistema de revestimento e que foram adotadas no modelo numérico em EF deste trabalho.

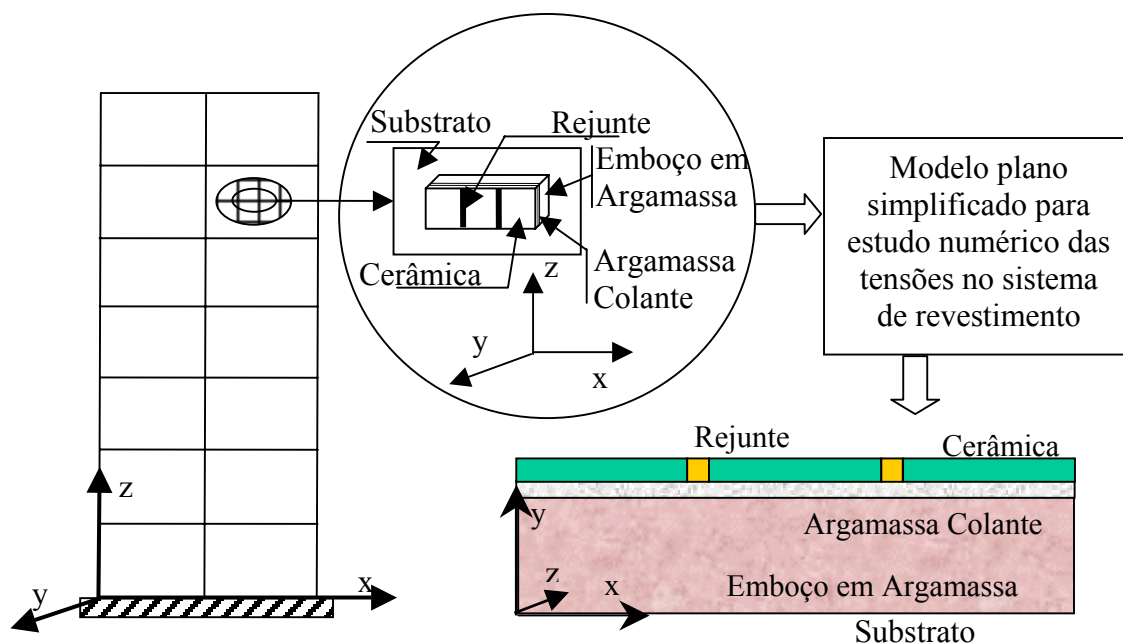


Figura 5.1 – Hipótese simplificadora de estado plano

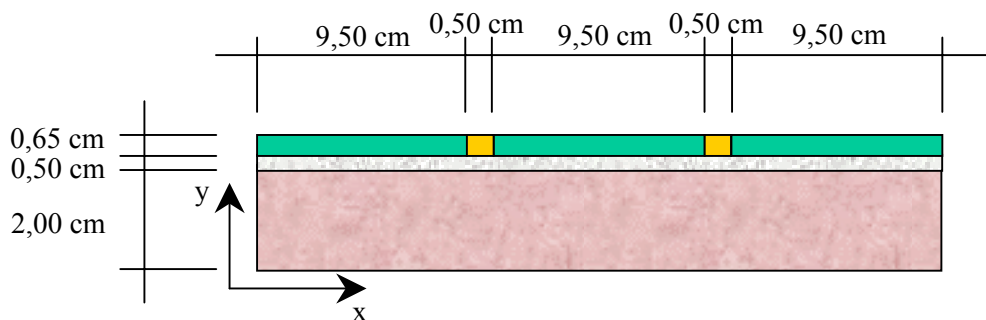


Figura 5.2 – Dimensões típicas e adotadas no modelo do sistema de revestimento

O modelo numérico adotado usa a biblioteca de elementos finitos disponibilizada pelo Programa Comercial ANSYS (1994). Dentre os elementos disponíveis, usou-se o elemento plano PLANE55 para a análise do transiente térmico e, em seguida, o PLANE42 para a análise das tensões termomecânicas. Ambos os elementos são utilizados em análises de sólidos bidimensionais (2D) e permitem análise em estado plano de deformação. Cada um dos elementos possui quatro nós. Para a análise do transiente térmico, o PLANE55 tem um grau de liberdade por nó, ou seja, a temperatura. Para a análise das tensões, o PLANE42 tem dois graus de liberdade por nó (deslocamentos em “x” e “y”). A Figura 5.3 apresenta a geometria de ambos os elementos PLANE42 e PLANE55 do programa ANSYS.

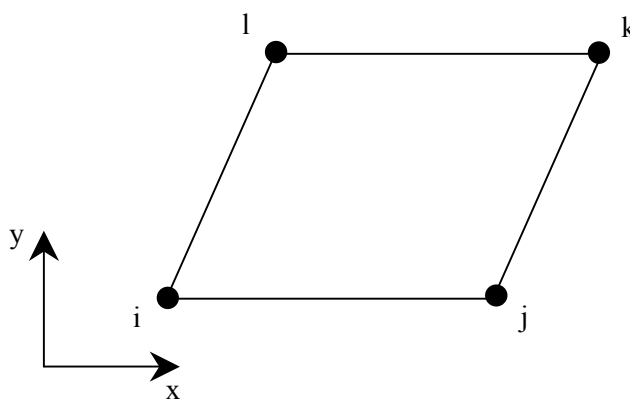


Figura 5.3 – Geometria dos elementos PLANE42 e PLANE55 do ANSYS

As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram as propriedades requeridas para os elementos PLANE55 e PLANE42 utilizados, respectivamente, para a análise térmica e estrutural do modelo numérico referente ao sistema de revestimento. Após as considerações que serão feitas, a seguir, sobre as condições de contorno para o modelo em elementos finitos, a malha de elementos finitos adotada será apresentada.

Tabela 5.1 – Propriedades requeridas do elemento PLANE55

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 5.2 – Propriedades requeridas do elemento PLANE42

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	Módulos de deformação: EX, EY
	Coefficiente de Poisson: NUXY
	Coefficiente 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)

5.2.1 – Propriedades dos Materiais no Modelo Numérico

O modelo numérico, mostrado na Figura 5.2, necessita das propriedades dos materiais exigidas por cada elemento PLANE55 e PLANE42, conforme a análise a ser feita, se transiente térmico ou de tensão e que estão resumidas nas Tabelas 5.1 e 5.2. Da Tabela 5.2, o módulo de deformação referente à argamassa foi obtido nos ensaios descritos no Capítulo 4. Outras propriedades, como o coeficiente de Poisson, o coeficiente de dilatação térmica e a condutividade térmica foram atribuídos, respectivamente, de acordo com os valores recomendados por Jastrzebski (1977), por Rivero (1985) e pelo relatório número 16277 do IPT (1981). Outras propriedades, como massas específicas, módulos de elasticidade e coeficientes de Poisson da argamassa colante, rejunte e cerâmica, foram

utilizados a partir das pesquisas conduzidas de Saraiva (1998). As Tabelas 5.3 e 5.4 apresentam um resumo das propriedades usadas para os elementos PLANE55 e PLANE42.

Tabela 5.3 – Propriedades atribuídas ao elemento PLANE55

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

Tabela 5.4 – Propriedades atribuídas ao elemento PLANE42

Material	Módulo de Elasticidade (EX em GPa)	Coef. de Dilatação Térmica (ALPX em °C⁻¹)	Coefficiente de Poisson (NUXY)
Emboço	5,499	11,5 x 10 ⁻⁶	0,2
Argamassa Colante	3,562	8,7 x 10 ⁻⁶	0,2
Rejunte	7,879	4,2 x 10 ⁻⁶	0,2
Cerâmica	41,600	6,8 x 10 ⁻⁶	0,2

5.2.2 – Condição de Contorno Adotada

A definição das condições de contorno tem influência, diretamente, sobre a precisão da modelagem numérica do sistema de revestimento. Buscando obter condições de contorno conservadoras, mas não distantes da realidade, Saraiva (1998) considerou o sistema de revestimento apoiado sobre um substrato rígido. Neste substrato, as deformações na direção y são nulas. Portanto, na parte inferior do modelo da Figura 5.2, há impedimento de deslocamento na direção y (ver Figura 5.4). Como no modelo apenas três cerâmicas da região central da fachada são consideradas, há necessidade de se definir uma região que possa representar o restante da fachada, ou seja; que seja equivalente ao restante da fachada. Arbitrou-se uma região de 5cm como mostra a Figura 5.4.

Para esta estreita faixa, que representa o restante da fachada, cuidado especial deve ser tomado a fim de que ela possa, efetivamente, representar a rigidez do restante da fachada. Nota-se que, as propriedades equivalentes que serão definidas para esta região levam em conta o tamanho da região (se uma faixa de 5cm ou de diferente largura). Assim, a Figura 5.4 resume as condições de contorno adotadas no modelo numérico.

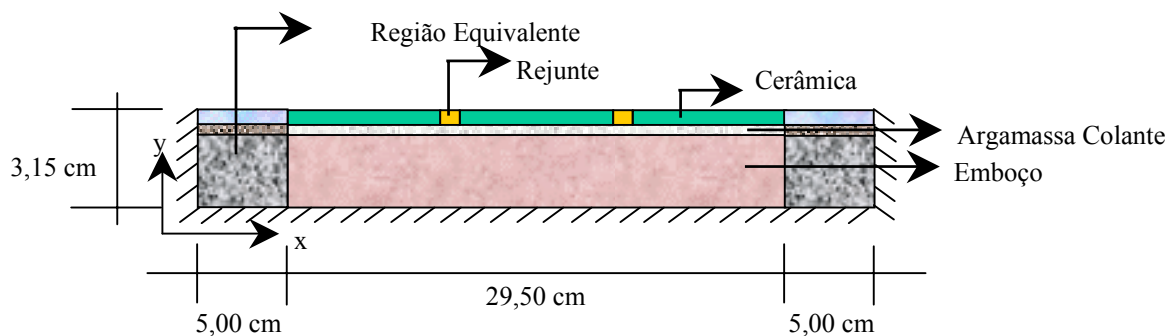


Figura 5.4 – Modelo com fachada equivalente de 5 cm em cada lado

5.2.3 - Cálculo da Fachada Equivalente

Consideramos como fachada equivalente, as duas regiões de 5,0cm de extensão de cada lado, representadas na Figura 5.4. 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 ao eixo x é de apenas 5,0cm de extensão, mas a espessura do modelo continua a mesma, ou seja, 3,15cm; 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 y não sofrem alteração, pois a espessura das regiões que representam a fachada equivalente não se altera. Já as propriedades do eixo x 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.

5.2.3.1 – 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 5.1.

$$\sigma = \varepsilon.E, \text{ sendo } \varepsilon = \Delta L/L_0 \quad (5.1)$$

onde, σ = Tensão; ε = Deformação; E = Módulo de Elasticidade; Δl = 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 5.2:

$$\sigma = E\Delta L/L_0 \quad (5.2)$$

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, conseqüentemente, usando a Equação 5.2, obtemos para a fachada real e para a fachada equivalente:

$$E_F(\Delta L/L_F) = E_{Eq}(\Delta L/L_{Eq}) \quad (5.3)$$

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 5.3, obtemos:

$$E_{Eq} = E_F(l_{Eq}/l_F) \quad (5.4)$$

sendo, $l_F = 490,0 - 29,5 = 460,5\text{cm}$ é o comprimento do restante da fachada e usando os valores definidos na Tabela 5.4 com $E_{Emboço} = 5499,0\text{MPa}$ e $E_{Arg.colante} = 3562,0\text{MPa}$, obtemos os valores equivalentes do módulo de elasticidade para o emboço e para a argamassa colante:

$$E_{Eq/emboço} = 119,41\text{MPa} \quad \text{e} \quad E_{Eq/Arg.colante} = 77,35\text{MPa}$$

Para o cálculo do módulo de elasticidade equivalente da cerâmica e rejunte (juntos), da Equação 5.2, obtém-se:

$$\Delta L = \sigma L_0 / E \quad (5.5)$$

o deslocamento (dilatação) de toda a fachada na camada de cerâmica mais rejunte, pode ser escrito como a soma:

$$\Delta l = \Delta L_{\text{Rejunte}} + \Delta L_{\text{Cerâmica}} \quad (5.6)$$

o comprimento inicial desta camada também é dado pela soma dos comprimentos do rejunte mais o da cerâmica:

$$L_o = L_{0/\text{Rejunte}} + L_{0/\text{Cerâmica}} \quad (5.7)$$

da Equação 5.5, para o módulo de elasticidade $E_{\text{Rejunte+Cerâmico}}$ equivalente da camada “cerâmica mais rejunte” para o comprimento $l_o = l_{0/\text{Rejunte}} + l_{0/\text{Cerâmica}}$, podemos escrever:

$$\Delta L = \frac{\sigma(L_{0/\text{Rejunte}} + L_{0/\text{Cerâmico}})}{E_{\text{Rejunte+Cerâmico}}} \quad (5.8)$$

da Equação 5.6 em conjunto com a Equação 5.5, para cada material isoladamente, temos que:

$$\Delta L = \frac{\sigma L_{0/\text{Rejunte}}}{E_{\text{Rejunte}}} + \frac{\sigma L_{0/\text{Cerâmico}}}{E_{\text{Cerâmico}}} \quad (5.9)$$

igualando as Equações 5.8 e 5.9, eliminando σ , obtém-se:

$$\frac{L}{E_{\text{Rejunte+Cerâmico}}} = \frac{L_{0/\text{Rejunte}}}{E_{\text{Rejunte}} (L_{0/\text{Rejunte}} + L_{0/\text{Cerâmica}})} + \frac{L_{0/\text{Cerâmica}}}{E_{\text{Cerâmica}} (L_{0/\text{Cerâmica}} + L_{0/\text{Rejunte}})} \quad (5.10)$$

portanto, o módulo de elasticidade equivalente para a “cerâmica mais o rejunte” pode ser calculado pela fórmula dada na Equação 5.11:

$$E_{\text{Rejunte+Cerâmico}} = \frac{E_{\text{Rejunte}} E_{\text{Cerâmico}} (L_{0/\text{Rejunte}} + L_{0/\text{Cerâmica}})}{L_{0/\text{Rejunte}} E_{\text{Cerâmico}} + L_{0/\text{Cerâmico}} E_{\text{Rejunte}}} \quad (5.11)$$

na Equação 5.11, usando $L_{0/\text{Rejunte}} = 2 \times 0,50 = 1,00\text{cm}$; $L_{0/\text{Cerâmico}} = 3 \times 9,50 = 28,50\text{cm}$ e com $E_{\text{Cerâmico}} = 41600,00\text{MPa}$ e $E_{\text{Rejunte}} = 7879,00\text{MPa}$, retirados da Tabela 5.4, encontramos:

$$E_{\text{Rejunte+Cerâmico}} = 36.329,34\text{MPa}$$

Para acharmos o módulo de elasticidade equivalente para as condições de contorno relativas às duas faixas de 5cm (Figura 5.4), partimos do princípio que as tensões na faixa sejam iguais a tensão na camada completa de cerâmica mais rejunte. Isto é, $\sigma_F = \sigma_{\text{Eq}}$.

Portanto, da Equação 5.3, temos:

$$E_F \frac{\Delta L}{L_F} = E_{\text{Eq/Rejunte+Cerâmica}} \frac{\Delta L}{L_{\text{Eq/Rejunte+Cerâmica}}} \quad (5.12)$$

logo:

$$E_{\text{Eq/Rejunte+Cerâmica}} = E_F \frac{L_{\text{Eq/rejunte+Cerâmico}}}{L_F} \quad (5.13)$$

portanto, se $E_F = E_{\text{Rejunte+Cerâmico}} = 36.329,34\text{MPa}$; $L_F = 490 - (3 \times 9,5 + 2 \times 0,5) = 460,50\text{cm}$; e $L_{\text{Eq/Rejunte+Cerâmico}} = 5,0 \times 2 = 10,0\text{cm}$, obtemos da Equação 5.13

$$E_{\text{Eq/Rejunte+Cerâmico}} = 788,91\text{MPa}$$

A Tabela 5.5 apresenta os valores dos módulos de elasticidade equivalentes para a região de 5cm que representará, no modelo numérico, toda a fachada.

Tabela 5.5 – Módulo de Elasticidade Equivalente

Material	Módulo de Elasticidade Equivalente (GPa)
Emboço	0,11941
Argamassa Colante	0,07735
Rejunte + Cerâmica	0,78891

5.2.3.2 – 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 5.14.

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (5.14)$$

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 5.15:

$$\Delta L_{Eq} = \Delta L_F \quad (5.15)$$

onde: Δl_{Eq} = Variação do comprimento da fachada equivalente; e Δl_F = Variação do comprimento do restante da fachada. Substituindo a Equação 5.14 em 5.15:

$$\alpha_{Eq} \cdot L_{Eq} \cdot \Delta T = \alpha_F \cdot L_F \cdot \Delta T \quad (5.16)$$

portanto:

$$\alpha_{Eq} = \alpha_F \cdot \frac{L_F}{L_{Eq}} \quad (5.17)$$

com os valores dos coeficientes de dilatação térmica da Tabela 5.4, $\alpha_{Emboço} = 11,5 \times 10^{-6} / ^\circ C$

e $\alpha_{Arg.colante} = 8,7 \times 10^{-6} / ^\circ C$, e sabendo-se que $L_F = 490 - (3 \times 9,5 + 2 \times 0,5) = 460,50 \text{ cm}$ e

$L_{Eq/Rejunte+Cerâmico} = 5,0 \times 2 = 10,0 \text{ cm}$. Obtemos:

$$\alpha_{Eq/Emboço} = 0,00053 / ^\circ C \text{ e } \alpha_{Eq/Arg.colante} = 0,00040 / ^\circ C$$

Para os cálculos do coeficiente de dilatação linear equivalente da cerâmica e do rejunte foram feitas as seguintes considerações:

$$\Delta L = \Delta L_{Cerâmico} + \Delta L_{Rejunte} \quad (5.18)$$

$$\Delta L = (L_{Cerâmico} + L_{Rejunte}) \alpha_{Cerâmico+Rejunte} \cdot \Delta t \quad (5.19)$$

$$\Delta L = L_{Cerâmico} \alpha_{Cerâmico} \Delta t + L_{Rejunte} \alpha_{Rejunte} \Delta t \quad (5.20)$$

$$\alpha_{Cerâmico+Rejunte} = \frac{L_{Cerâmico} \alpha_{Cerâmico} + L_{Rejunte} \alpha_{Rejunte}}{L_{Cerâmico} + L_{Rejunte}} \quad (5.21)$$

e, com os valores da Tabela 5.4 das propriedades atribuídas ao elemento PLANE42, sendo:

$\alpha_{Cerâmica} = 6,8 \times 10^{-6} / ^\circ C$; $\alpha_{Rejunte} = 4,2 \times 10^{-6} / ^\circ C$; $L_{Cerâmica} = 3 \times 9,50 = 28,50 \text{ cm}$ e

$L_{Rejunte} = 2 \times 0,50 = 1,00 \text{ cm}$. Obtemos:

$$\alpha_{Cerâmica+Rejunte} = 6,71 \times 10^{-6} / ^\circ C$$

Para o valor equivalente à região de 5cm na Figura 5.4, temos

$$\alpha_{Eq/Cerâmica+Rejunte} = \alpha_{Cerâmica+Rejunte} \frac{L_F}{L_{Eq}} \quad (5.22)$$

resultando em:

$$\alpha_{\text{Eq/Cerâmica+Rejunte}} = 0,00031/^{\circ}\text{C}$$

A Tabela 5.6 resume os valores calculados dos coeficientes de dilatação linear equivalente para as regiões de 5cm, representadas para a fachada na Figura 5.4.

Tabela 5.6 – 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

5.3 – O TRANSIENTE TÉRMICO ADOTADO

Entre as diversas intempéries sofridas pelo sistema de revestimento cerâmico (ver Capítulo 1), esta pesquisa estuda apenas o efeito da variação de tensões devido aos transientes térmicos. Tais transientes geram tensões flutuantes e cíclicas que, progressivamente, podem levar os materiais do sistema de revestimento ao colapso por fadiga, mesmo estando estes sob tensão aquém dos limites de resistência dos materiais.

O modelo simplificado (Figura 5.4) a ser discretizado em elementos finitos tem como objetivo avaliar as tensões decorrentes de solicitações térmicas transientes nas fachadas das edificações.

Foi considerada que a fachada se localiza na cidade de Brasília. O clima de Brasília é tropical de altitude, ou seja; tem a temperatura amenizada pela altitude média de 1.100m. Brasília possui inverno seco com umidade muito baixa e verões quentes com bastante chuva. A temperatura média de Brasília é de, aproximadamente, 21°C, mas já se atingiu mínima de 1,6°C, em 18/07/1975, e máxima de 34,6°C, registrada em 12/10/1963 (INMET, 2006). Brasília tem, ainda, precipitações anuais que alcançam a média de

1675mm, com 80% das chuvas concentrando-se no verão. No período de pouca chuva, a umidade relativa do ar em Brasília pode atingir valores abaixo de 20%.

Para se selecionar um transiente térmico, foi pesquisado no INMET, dentre os transientes diários registrados, aquele transiente mais severo já ocorrido em Brasília. Segundo o INMET (2006), a Tabela 5.7 apresenta o transiente de temperatura registrado no ano de 1963, no dia mais quente de Brasília. Este transiente será o escolhido para o estudo de fadiga nesta pesquisa.

Para se chegar às temperaturas incidentes na fachada, são consideradas, além das temperaturas decorrentes da incidência solar, também a temperatura decorrente da absorção da radiação solar. As temperaturas em cada camada (cerâmica e rejunte, argamassa colante e argamassa de emboço) podem ser calculadas a partir do fluxo térmico incidente e por condução de calor, de acordo com os fundamentos de troca de calor em fachadas, explicados no Capítulo 3. Isto será feito impondo-se a temperatura transiente escolhida para o dia mais quente na cidade de Brasília (na Equação 3.15, no valor de t_q). A temperatura obtida é, então, imposta na superfície externa e na linha de contato com o substrato do modelo em elementos finitos adotado.

Para a análise térmica do revestimento cerâmico foi considerado um revestimento de fachada externa com cerâmicas claras e, outro, com cerâmicas escuras. O coeficiente de absorção térmica, sugerido por Thomaz (1989), para superfície de cor clara é de 0,45 e para superfície de cor escura é de 0,95.

Com o transiente térmico fornecido pelo INMET (2006) e apresentado na Tabela 5.7, foi feito um estudo do fluxo de calor através do modelo reduzido da fachada (Figura 5.2). Este estudo está apresentado no Apêndice A, juntamente com a modelagem analítica para traçar o perfil térmico do modelo simplificado, a partir das temperaturas nas interfaces entre as camadas do revestimento cerâmico (pontos t_e , t_2 , t_3 , t_4 e t_i), como mostrado na Figura 5.5.

Tabela 5.7 – Transiente de Temperatura de Brasília em 1963

Hora	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00
Te (°C)	24,49	23,46	22,48	22,55	22,71	22,41	22,14	23,20	25,32	28,96	31,38	32,51
Hora	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00

T_e (°C)	32,84	33,67	33,98	34,21	34,60	34,42	34,34	32,79	28,46	26,48	25,94	24,71
------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

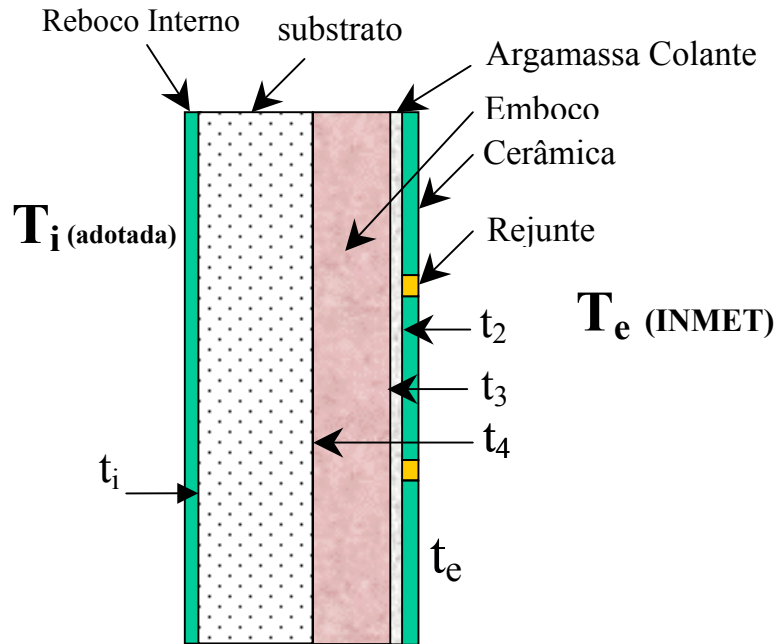


Figura 5.5 - Leitura da temperatura nas interfaces do revestimento cerâmico

Para o modelo simplificado descrito na Figura 5.5, interessam as temperaturas nas interfaces externa (t_e) e na interface com o substrato (t_4). Também é importante a temperatura de referência, em torno da qual, podem ser calculadas as tensões. Para esta temperatura de referência é feita a hipótese de uma temperatura arbitrária (arbitrária, mas não tanto, pois está baseada nas médias de temperatura em Brasília). Tal temperatura diz respeito ao período de construção da fachada. De forma conservadora, adotamos as temperaturas médias de 18°C, para o inverno, e 25°C, para o verão.

Os gráficos das Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 mostram as variações das temperaturas ao longo do dia para as cerâmicas claras e as escuras considerando, também, que a parte interna do sistema de revestimento encontra-se a uma temperatura de 18°C e de 25°C. Os transientes apresentados são relativos ao dia mais quente, registrado em Brasília. Os dados de entrada dos gráficos são apresentados no Apêndice A.

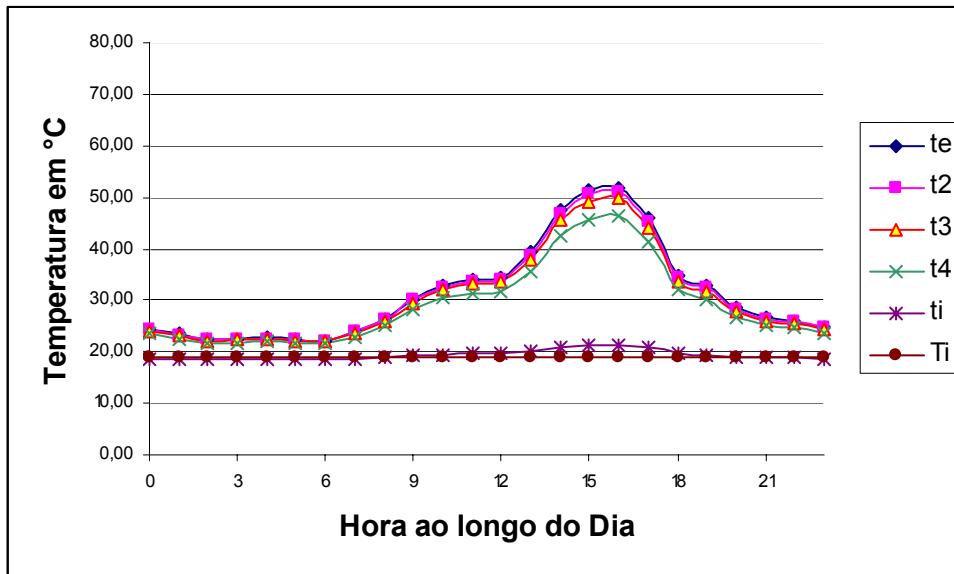


Figura 5.6 – Transiente-1: variação da temperatura na superfície externa do sistema de revestimento com cerâmica clara e com 18°C de temperatura interna

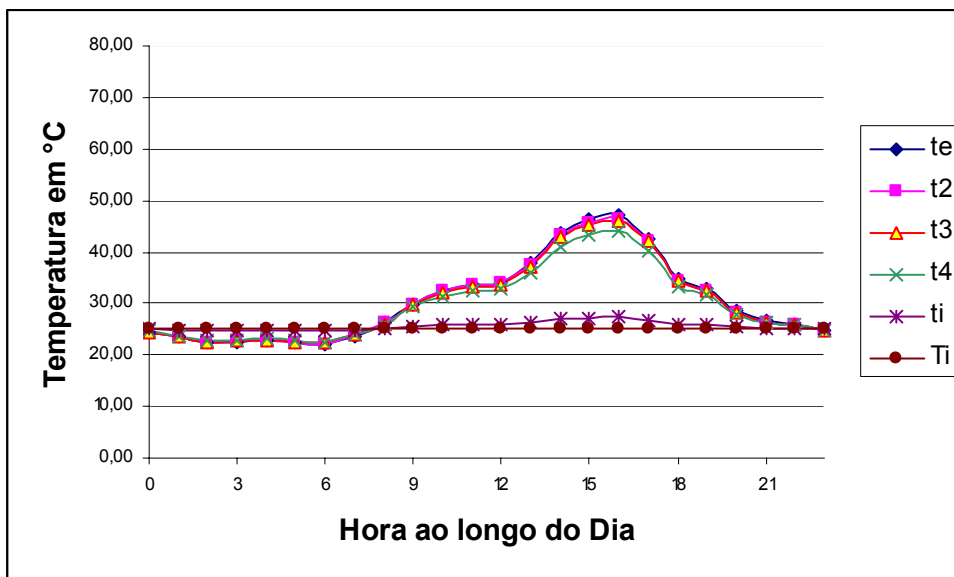


Figura 5.7 – Transiente-2: variação da temperatura na superfície externa do sistema de revestimento com cerâmica clara e com 25°C de temperatura interna

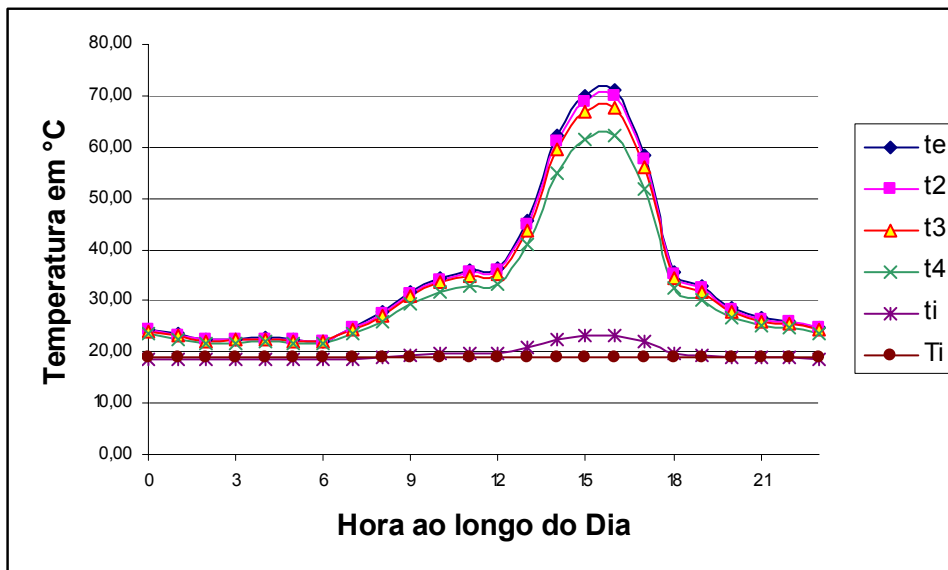


Figura 5.8 – Transiente-3: variação da temperatura na superfície externa do sistema de revestimento com cerâmica escura e com 18°C de temperatura interna

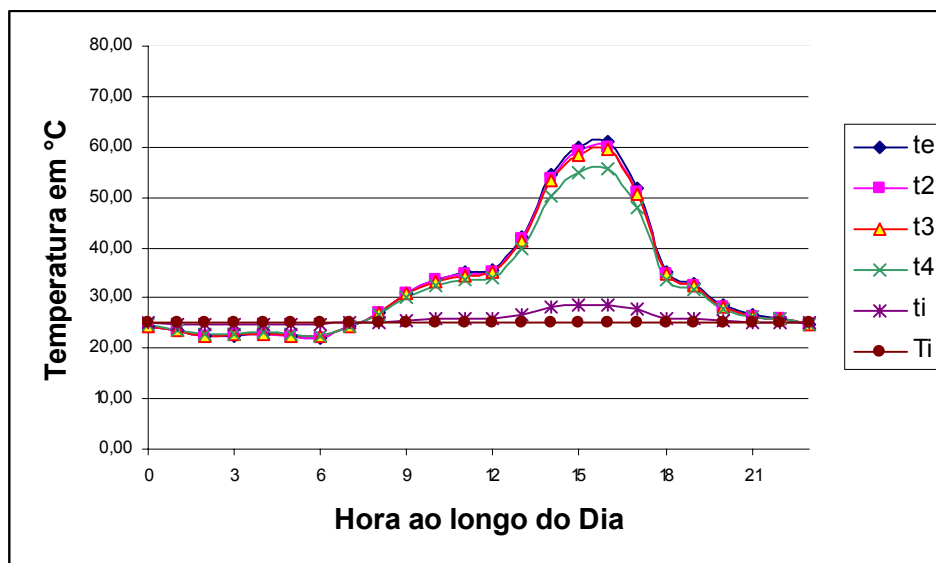


Figura 5.9 – Transiente-4: variação da temperatura na superfície externa do sistema de revestimento com cerâmica escura e com 25°C de temperatura interna

5.4 – O MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

Definido o modelo simplificado, escolhidos os elementos finitos a usar, as condições de contorno a se impor no modelo simplificado, as propriedades dos materiais e o carregamento do transiente térmico, define-se, agora, o modelo em elementos finitos.

A discretização em elementos finitos do modelo simplificado está apresentada na Figura 5.10. Para a análise térmica é usado o elemento finito PLANE55 e, para a análise de tensões atuantes no revestimento e decorrentes do transiente térmico, é usado o elemento finito PLANE42. A malha está apresentada na Figura 5.10 e corresponde ao modelo em elementos finitos que é usado para a análise térmica e, também, para a análise das tensões termomecânicas. Ambos os modelos tem a mesma malha. A malha é composta por 2208 elementos e 4197 nós (com elementos PLANE42). Para estes dois tipos de análise, os materiais apresentam propriedades diferentes e, na malha da Figura 5.10, para cada tipo de material, há uma cor diferente a fim de se poder fazer distinção entre os diversos materiais que compõem o sistema de revestimento.

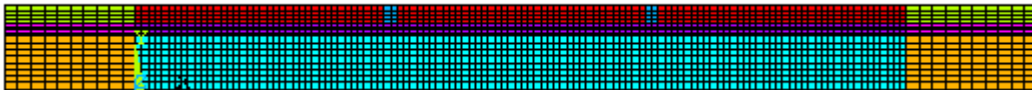


Figura 5.10 – Modelo numérico em elementos finitos

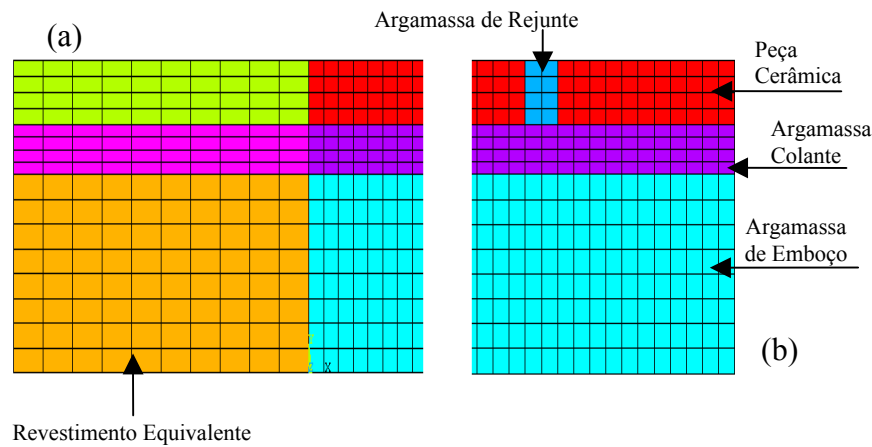


Figura 5.11 – Detalhes do modelo em elementos finitos (a) na fachada equivalente (b) na região do emboço, da argamassa colante, rejunte e cerâmica

A Figura 5.11 (a) e (b) mostra detalhes da malha para a parte equivalente da fachada e para a parte com cerâmica, rejunte, argamassas colante e de emboço. A região referente à fachada equivalente não é de interesse desta pesquisa, no que diz respeito ao cálculo das tensões - já que é uma área fictícia de equivalência. A região da argamassa de emboço, argamassa colante, rejunte e cerâmica é de grande interesse para a leitura das tensões

atuantes no sistema de revestimento, em especial para o cálculo da vida à fadiga da argamassa de emboço.

A imposição das condições de contorno se divide para os dois modelos. Para a análise térmica, impõe-se um dos transientes de temperatura descritos nas Figuras 5.6 à 5.9. Estas condições de contorno estão representadas na Figura 5.12, com setas na parte superior e inferior do modelo, indicando imposição de temperaturas (dos transientes). As regiões à direita e esquerda do modelo são consideradas adiabáticas, por onde não há troca de calor.

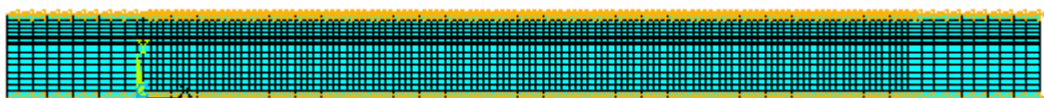


Figura 5.12 – Condição de contorno para análise térmica no ANSYS

Para a análise de tensões, as condições de contorno são impostas em termos de impedimento de deslocamentos. Elas estão representadas na Figura 5.13. Estas condições consistem em bloquear deslocamentos na direção y , na interface com o substrato, e impedir deslocamentos na direção x , nos extremos (à direita e à esquerda) do modelo em EF.

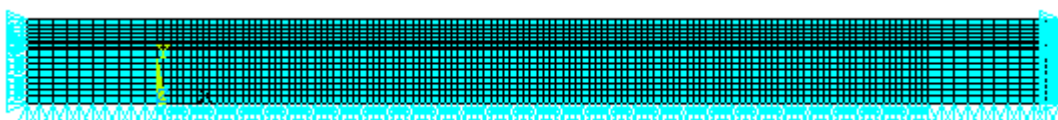


Figura 5.13 – Condição de contorno para análise termomecânica no ANSYS

Os carregamentos utilizados são os transientes térmicos para a análise térmica e, os mapas nodais de temperaturas (gerados pela análise de EF dos transientes térmicos) para as análises de tensão termomecânica.

Com o modelo em EF podemos avaliar as tensões normais σ_x (na direção x), σ_y (na direção y), e de cisalhamento σ_{xy} das regiões superior, central e inferior de cada camada do sistema de revestimento e nas interfaces entre argamassa colante e peças cerâmicas e entre argamassa de emboço e substrato.

6 – ANÁLISES TÉRMICA, DE TENSÃO E DE FADIGA

6.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão analisados alguns casos de incidência de transientes térmicos em sistemas de revestimento cerâmico. A distribuição de temperatura e de tensão será objeto de estudo usando-se o modelo simplificado e análises feitas pelo MEF quando o sistema de revestimento estiver submetido aos transientes térmicos definidos no Capítulo 5. A curva experimental de comportamento à fadiga da argamassa, obtida no Capítulo 4, será utilizada para a avaliação da vida útil do sistema de revestimento, em especial da argamassa de emboço.

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 cerâmicas do sistema de revestimento (cerâmica clara e escura). A Tabela 6.1 resume os casos a serem estudados.

Tabela 6.1 – Casos para análise

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

Inicialmente, são reportados os resultados de distribuição de temperatura ao longo dos transientes e, em seguida, a distribuição de tensão e a análise de fadiga. 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-A', na Figura 6.1, representa uma região de junções das peças cerâmicas com a argamassa de rejunte e, ainda, intercepta a argamassa colante e a de emboço.

No modelo em elementos finitos, definido no Capítulo 5, destaca-se na Figura 6.2a, a região para a avaliação da distribuição de temperatura e de tensão. Em particular, na Figura 6.2b destacam-se os nós do modelo em EF para a leitura das tensões. Estes nós estão nas camadas e nas interfaces dos materiais.

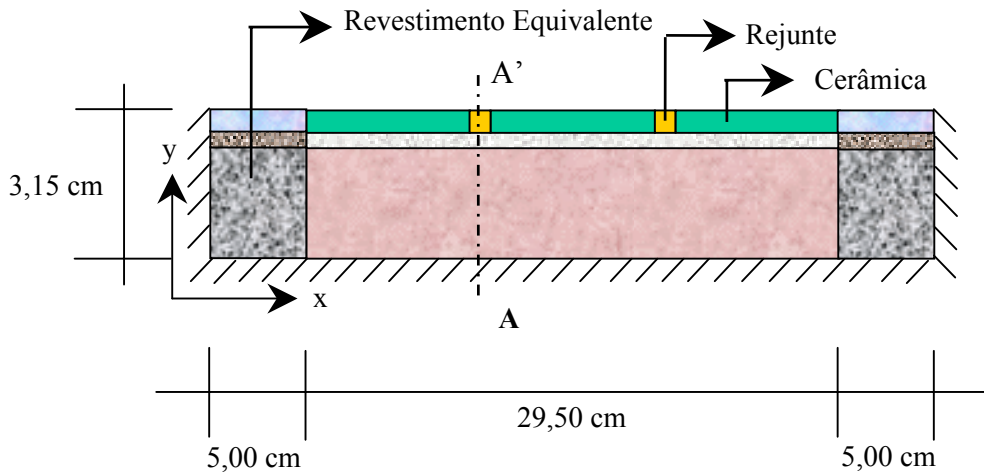


Figura 6.1 – Área em destaque que será estudada

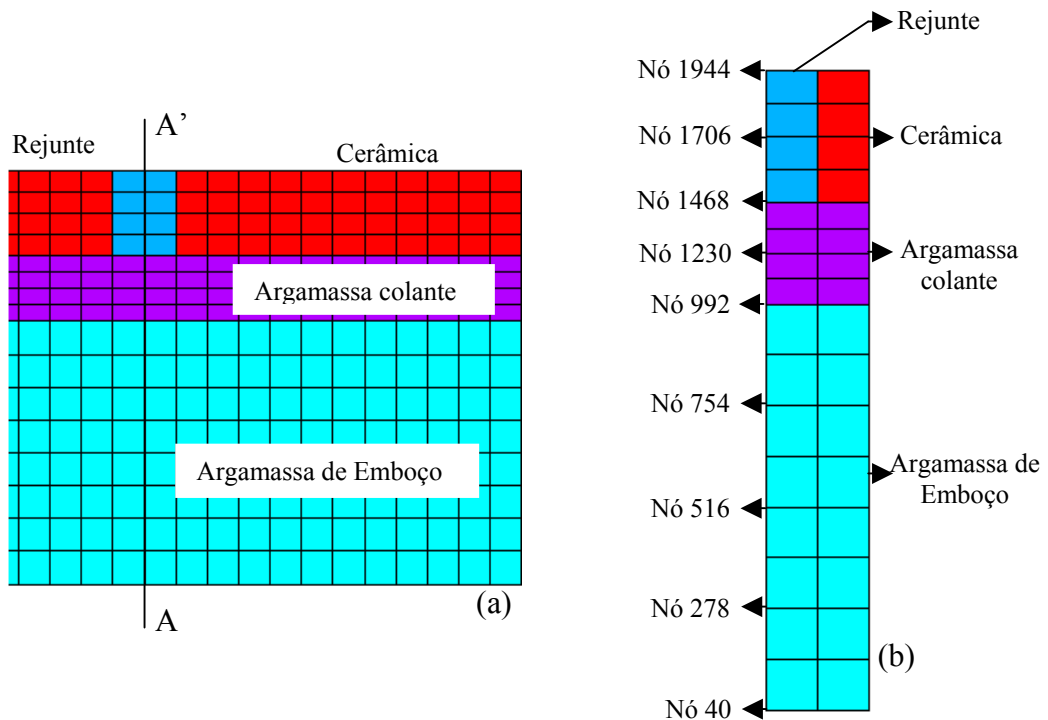


Figura 6.2 – Detalhe da (a) região e (b) dos nós de interesse

Nas análises de tensão para a avaliação da resistência à fadiga, necessita-se do cálculo das tensões principais – ver seção 3.4.4.

As análises com o MEF para cada caso especificado na Tabela 6.1 são do tipo térmico e de tensão. A seguir, são apresentados os resultados das análises térmica e de tensão.

6.2 – ANÁLISES TÉRMICAS

As temperaturas “ t_e ” e “ t_4 ” dos transientes definidos nas Figuras 5.6 (para o Caso-1), 5.7 (para o Caso-2), 5.8 (para o Caso-3) e 5.9 (para o Caso-4), são impostas ao modelo em EF definido na Figura 5.10. As temperaturas impostas são condições de contorno cuja aplicação está ilustrada na Figura 5.12.

Ao longo da ação destes transientes há variações das temperaturas nas camadas do sistema de revestimento. A situação mais crítica, ou seja, de maiores diferenças de temperatura através das camadas para os quatro casos analisados ocorre às 16h e as faixas de mesma temperatura para cada caso estão apresentadas nas Figuras 6.3, 6.4, 6.5 e 6.6.

Nas Figuras 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10 temos a distribuição das temperaturas ao longo da seção A-A’, representada nas Figuras 6.2a e b, para os quatro casos estudados. Os gráficos estão apresentados conforme o nó e separados em casos, conforme os transientes analisados (ver Tabela 6.1).

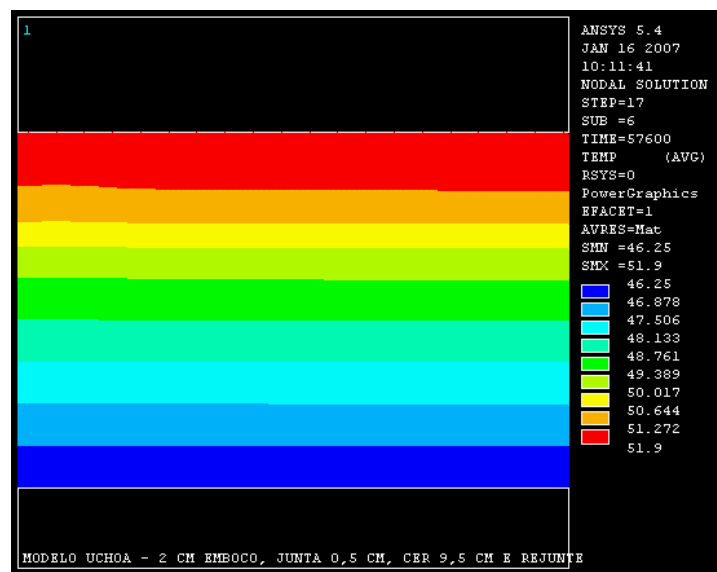


Figura 6.3 – CASO-1: Distribuição crítica de temperatura no sistema de revestimento para cerâmica clara e transiente 1: máxima temperatura 51,90°C

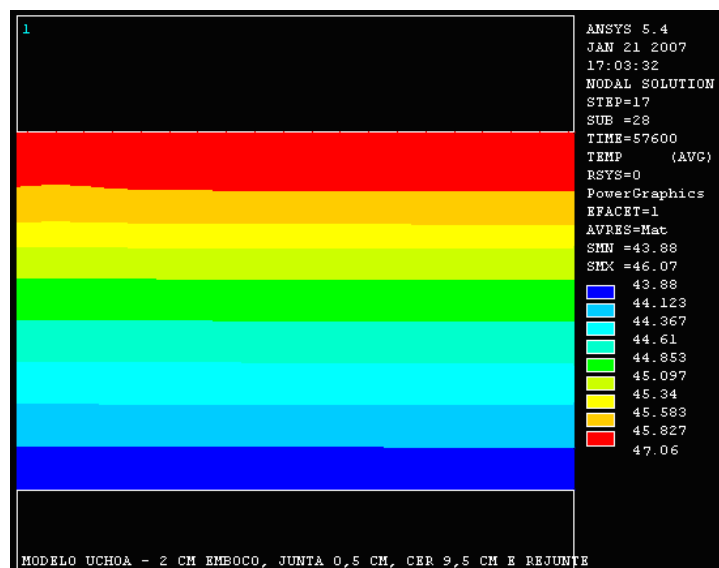


Figura 6.4 – CASO-2: Distribuição crítica de temperatura no sistema de revestimento para cerâmica clara e transiente 2: máxima temperatura 47,06°C

Observa-se que nas Figuras 6.7a e b para as cerâmicas claras, casos 1 e 2, cujos transientes térmicos usam, respectivamente, as temperaturas internas e de referência de 18°C e 25°C, as temperaturas máximas atingidas nas superfícies externas (t_e) são de 51,90°C e 47,06°C, respectivamente. Isso ocorre devido à troca de calor por condução, pois há perda de calor com variação de temperatura (Δt) de 33,90°C para o caso 1 e, de 22,06°C para o caso 2, como mostrado nas Figuras 6.3, 6.4 e 6.9a e b.

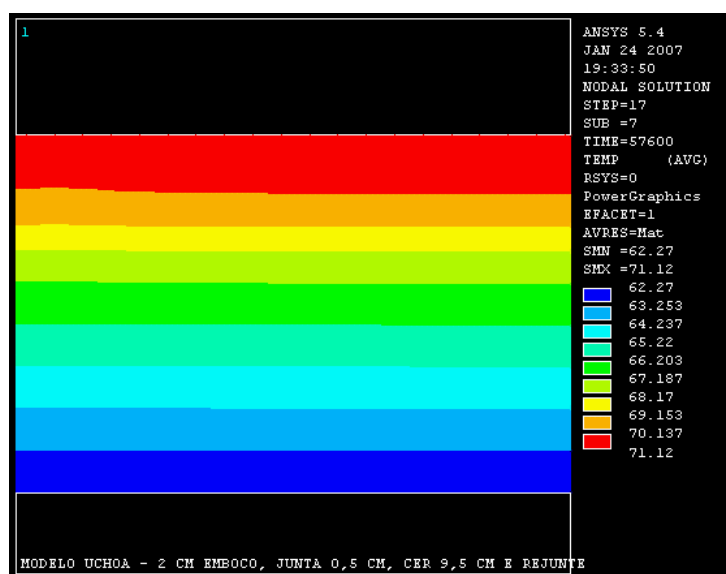


Figura 6.5 – CASO-3: Distribuição crítica de temperatura no sistema de revestimento para cerâmica escura e transiente 3: máxima temperatura 71,12°C

Para os casos 3 e 4, devido a cerâmica ter um alto índice de absorção térmica, a temperatura externa máxima na superfície da cerâmica (t_e) é de 71,12°C e 60,90°C, respectivamente, conforme mostra as Figuras 6.5, 6.6 e 6.8a e b. Note que, nestes dois casos, para as mesmas temperaturas internas (t_i) usadas nos casos 1 e 2, a variação de temperatura (Δt) por troca de calor por condução térmica é bem maior para os casos 3 e 4, com valores de 53,12° e 35,90°C, respectivamente, e mostrados na Figura 6.10a e b.

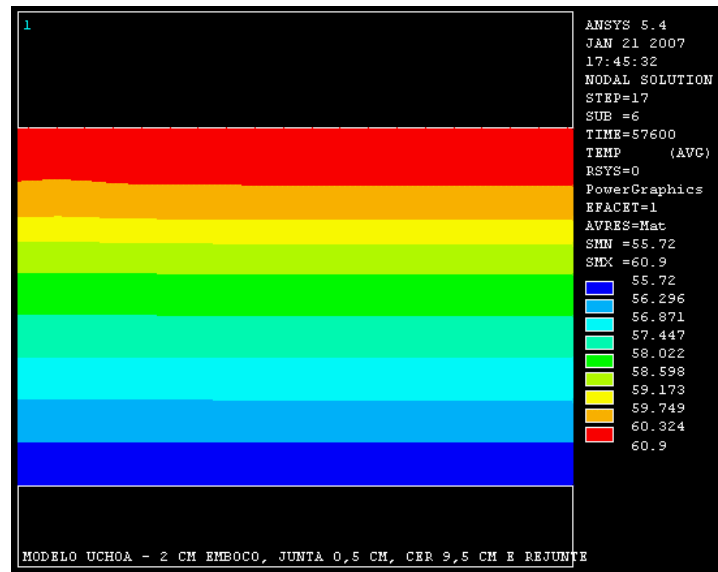
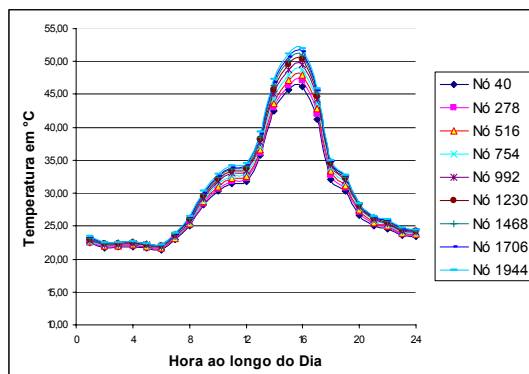
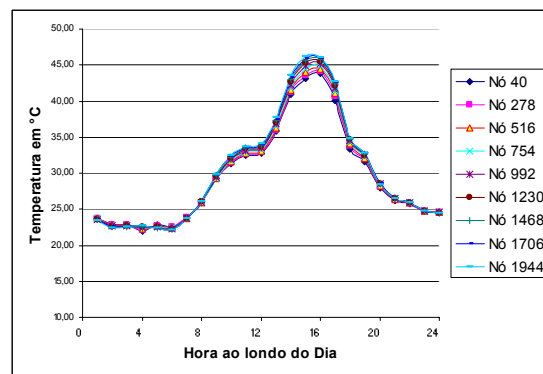


Figura 6.6 – CASO-4: Distribuição crítica de temperatura no sistema de revestimento para cerâmica escura e transiente 4: máxima temperatura 60,90°C

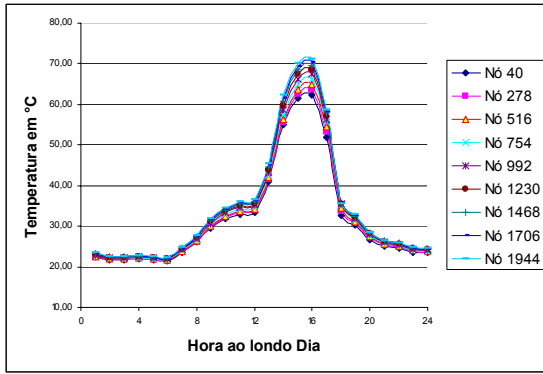


(a) – Caso 1

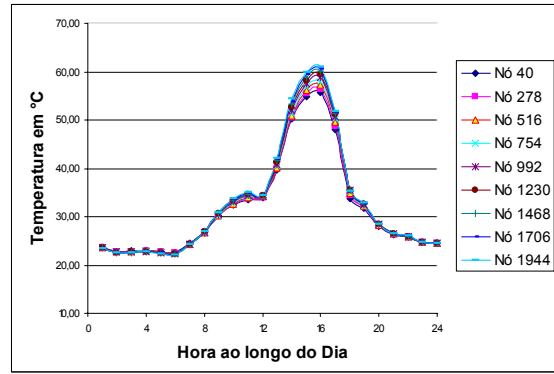


(b) - Caso 2

Figura 6.7 – CASOS 1 e 2: Transiente térmico na seção A-A' do sistema de revestimento para cerâmicas claras – valores nodais

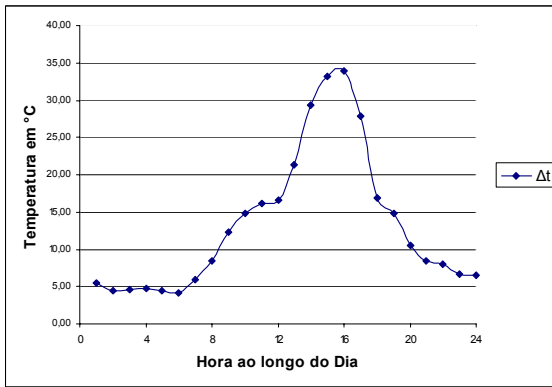


(a) - Caso 3



(b) - Caso 4

Figura 6.8 – CASOS 3 e 4: Transiente térmico na seção A-A' do sistema de revestimento para cerâmicas escuras – valores nodais

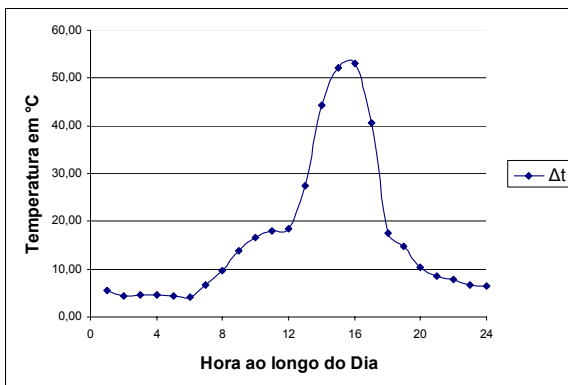


(a) - Caso 1



(b) - Caso 2

Figura 6.9 – CASOS 1 e 2: Diferença de temperatura na seção A-A' do sistema de revestimento para cerâmicas claras – valores nodais



(a) - Caso 3



(b) - Caso 4

Figura 6.10 – CASOS 3 e 4: Diferença de temperatura na seção A-A' do sistema de revestimento para cerâmicas escuras – valores nodais

6.3 – ANÁLISES DE TENSÃO

As figuras que se seguem mostram os principais resultados das análises de tensão devido aos transientes térmicos analisados. A orientação dos eixos “x” e “y” pode ser visualizada na Figura 6.1. 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 (ver nós do modelo na Figura 6.2b), para os quatro casos da Tabela 6.1, são apresentadas a seguir.

6.3.1 – Caso-1

6.3.1.1 - Análise da Tensão Normal S_x

As tensões S_x obtidas na análise numérica estão apresentadas na Figura 6.11. Pode-se verificar que estas tensões são de compressão, devido à influência da condição de contorno de confinamento adotada. Esta condição é conservadora e se ajusta bem à sistemas de revestimentos confinados por vigas e colunas - o que é comum nas edificações. Também pode ser observado que ocorre acentuada variação da tensão S_x no período do dia entre 7h e 18h. É neste período que existe a influência da radiação solar (I_g) sobre o sistema de revestimento cerâmico.

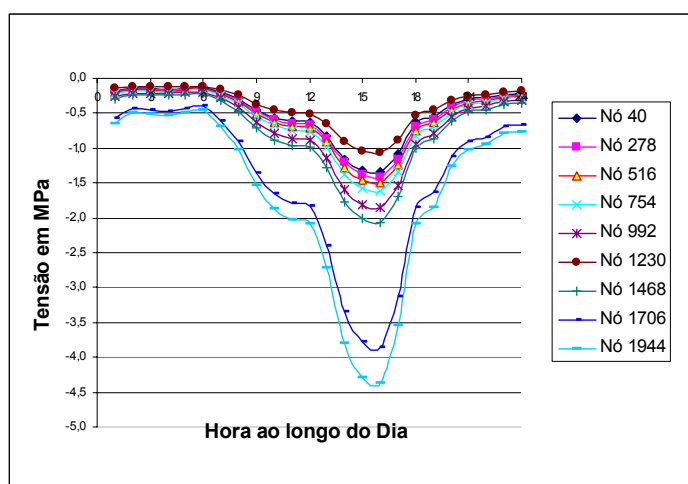


Figura 6.11 – Caso 1: Tensões S_x

Verifica-se ainda que o maior valor em magnitude da tensão de compressão S_x ocorre às 16h. Durante o dia, no horário de incidência da radiação solar, os menores valores

acontecem às 7h e às 18h. Em termos de magnitude de tensão, a argamassa colante sofre menor tensão que a argamassa de emboço. Isto ocorre não só devido às temperaturas diferentes como, também, as propriedades dos respectivos módulos de elasticidade e coeficientes de dilatação térmica combinados. As propriedades usadas no modelo de elementos finitos são apresentadas na Tabela 5.4. Com o intuito de mostrar a variação das tensões através das diversas camadas dos materiais que compõem o sistema de revestimento cerâmico, em horários de temperatura amena, alta e mediana, os horários 7h, 16h e 18h foram escolhidos respectivamente. A Tabela 6.2 reporta os valores da tensão S_x nestes horários e a Figura 6.12 mostra os respectivos gráficos associados.

Tabela 6.2 – Caso 1: Tensões S_x nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
7:00	-0,2026	-0,2114	-0,2242	-0,2434	-0,2833	-0,1650	-0,3217	-0,6105	-0,6966
16:00	-1,3369	-1,4086	-1,4964	-1,6170	-1,8602	-1,0677	-2,0583	-3,8508	-4,3749
18:00	-0,6367	-0,6962	-0,7549	-0,8205	-0,9366	-0,5302	-1,0092	-1,8593	-2,0939

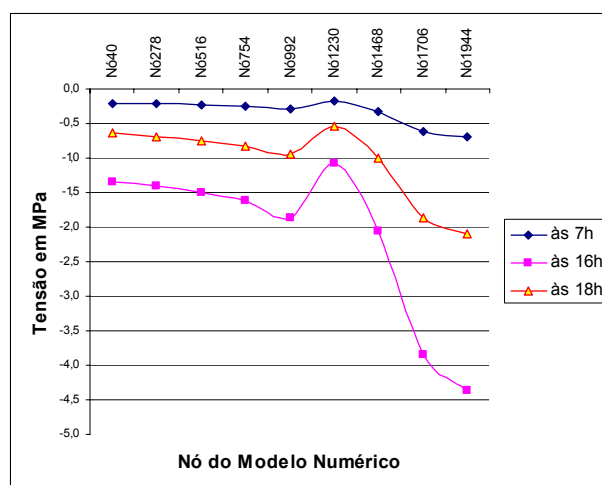


Figura 6.12 – Caso 1: Tensões S_x às 7h, 16h e 18h

É interessante observar que a tensão S_x tem um crescimento de variação muito pequeno até o nó 992 que representa a camada de emboço até a interface com a argamassa colante. Essa variação vai de -0,2026MPa até -1,8602MPa. Do nó 992 até o nó 1468, que representa a camada de argamassa colante até a interface com rejunte, observamos uma queda de tensão no nó 1230 devido ao baixo valor do módulo de elasticidade da argamassa colante. Entretanto, do nó 1468 até o nó 1944, que representa a camada de rejunte externo do

sistema de revestimento, verificamos uma grande intensidade na variação da tensão de compressão indo de -0,3217MPa até -4,3749MPa.

As tensões de compressão atuantes na argamassa de emboço que corresponde aos nós 40, 516 e 992 e às 16h são, respectivamente, -1,3369MPa, -1,4964MPa e -1,8602MPa.

6.3.1.2 - Análise da Tensão Normal S_y

Os resultados obtidos para as tensões normais ao longo do eixo Y para o modelo numérico, são mostrados na Figura 6.13.

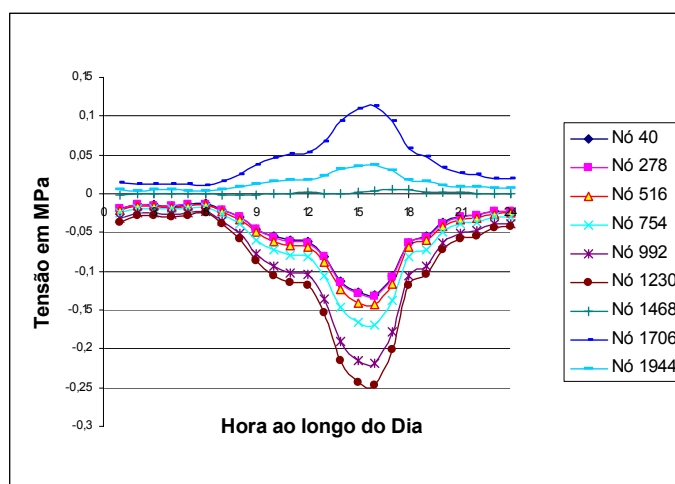


Figura 6.13 – Caso 1: Tensões S_y

Observa-se, inicialmente, que na região entre a interface da argamassa colante e o rejunte e na camada de rejunte externo, representados no modelo através dos nós 1468 e 1944, todas as tensões são de tração (não há confinamento na direção-y), e variam de 0,0002MPa à 0,1120MPa entre às 23h e 7h, respectivamente.

Tabela 6.3 – Caso 1: Tensões S_y nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
7:00	-0,0204	-0,0207	-0,0225	-0,0267	-0,0348	-0,0395	-0,0009	0,0163	0,0061
16:00	-0,1298	-0,1319	-0,1434	-0,1694	-0,2196	-0,2477	0,0029	0,1121	0,0364
18:00	-0,0630	-0,0640	-0,0695	-0,0819	-0,1058	-0,1187	0,0057	0,0585	0,0169

Em contrapartida, nas interfaces da argamassa colante e emboço (nó 992) e o emboço com o substrato (nó 40), as tensões normais ao longo do eixo Y, às 16h, se comportam como

tensão de compressão, e seus valores são -0,2196MPa e -0,1298MPa, como mostrado na Tabela 6.3 e na Figura 6.14.

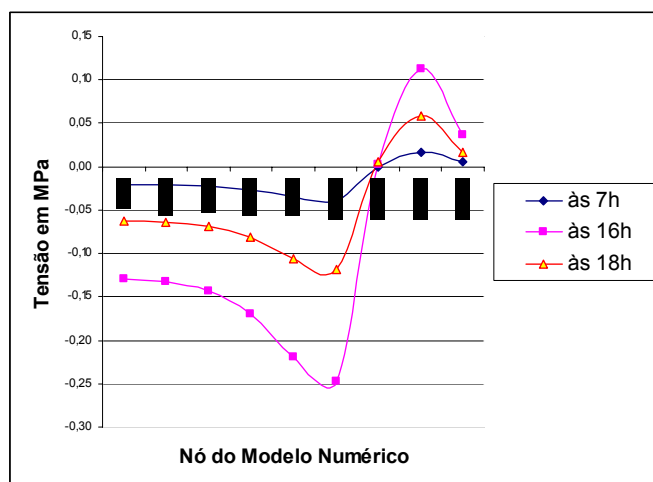


Figura 6.14 – Caso 1: Tensões S_y às 7h, 16h e 18h

6.3.1.3 - Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}

A Figura 6.15 mostra o comportamento das tensões de cisalhamento S_{xy} da seção da argamassa de rejunte do sistema de revestimento.

A maior variação de tensão de cisalhamento S_{xy} no sistema para este caso, ocorreu nos nós 1468 e 1944 (interface colante/rejunte) e no rejunte, com os valores de -0,2287MPa e 0,0318MPa, respectivamente. Enquanto que, na interface do emboço com substrato, a tensão de cisalhamento é, praticamente, nula (0,0017MPa), e na interface da camada de emboço com argamassa colante, a tensão de cisalhamento correspondente ao nó 992 é de 0,0265MPa, como mostrado na Tabela 6.4 e na Figura 6.16.

Tabela 6.4 – Caso 1: Tensões S_{xy} nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
7:00	0,0003	0,0008	0,0019	0,0032	0,0041	0,0017	-0,0356	0,0060	0,0041
16:00	0,0018	0,0054	0,0127	0,0205	0,0265	0,0109	-0,2287	0,0386	0,0318
18:00	0,0009	0,0027	0,0062	0,0100	0,0129	0,0051	-0,1127	0,0192	0,0178

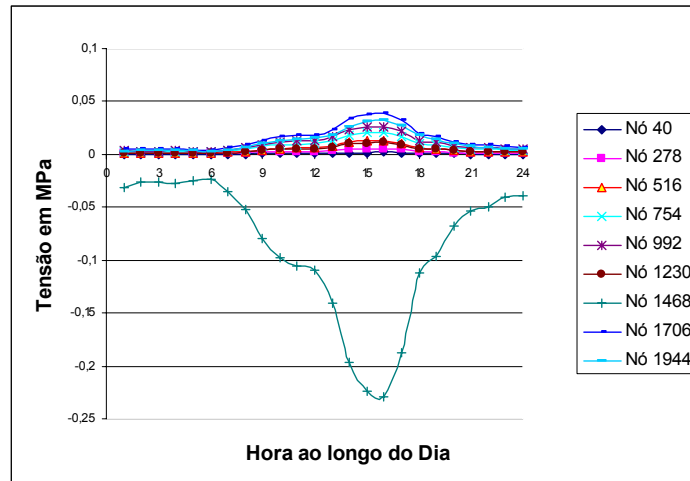


Figura 6.15 – Caso 1: Tensões S_{xy}

As tensões de cisalhamento S_{xy} atuantes na argamassa de emboço às 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, 0,0018MPa, 0,0127MPa e 0,0265MPa.

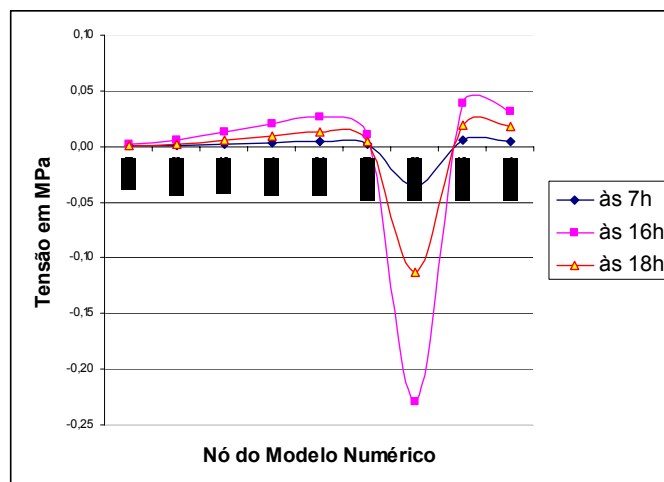


Figura 6.16 – Caso 1: Tensões S_{xy} às 7h, 16h e 18h

6.3.1.4 - Análise da Tensão S_1

A Figura 6.17 mostra as variações das tensões S_1 que correspondem à tensão de tração na região da superfície do revestimento e na interface do rejunte com a argamassa colante, nós 1944 e 1468, respectivamente. As tensões de tração variam de 0,0030MPa a 0,0367MPa e a tensão interna no rejunte é de 0,1124MPa. O sinal de S_1 muda para compressão na parte interna do sistema de revestimento cerâmico e varia de -0,0204MPa a -0,2192MPa, como mostrado na Tabela 6.5.

A Figura 6.18 apresenta o comportamento das tensões atuante no sistema de revestimento onde ocorre a incidência da radiação solar (I_g), onde se verifica a tensão máxima de tração no valor de 0,1124MPa e tensão máxima de compressão de -0,2476MPa, isso para às 16h onde a incidência solar alcança seu valor máximo.

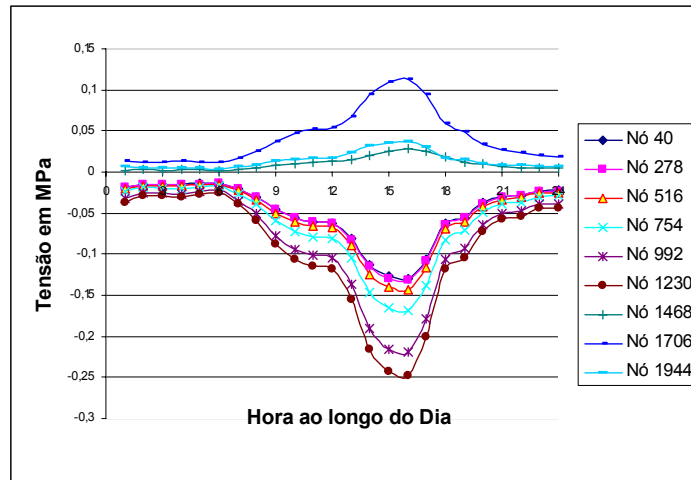


Figura 6.17 - Caso 1: Tensões S_1

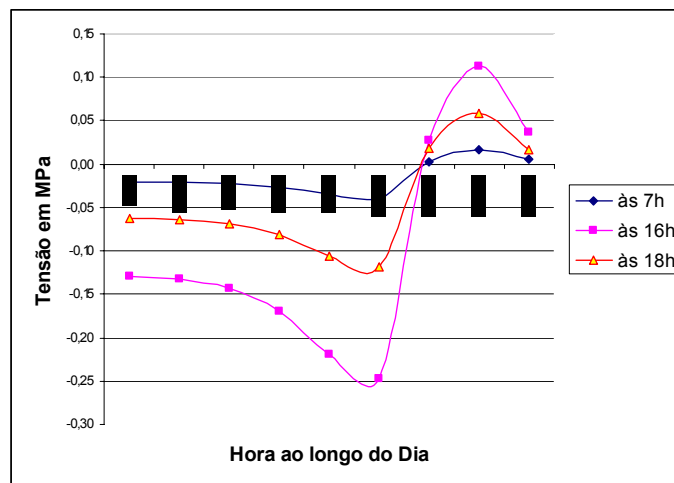


Figura 6.18 – Caso 1: Tensões S_1 às 7h, 16h e 18h

Tabela 6.5 – Caso 1: Tensões S_1 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
7:00	-0,0204	-0,0207	-0,0225	-0,0266	-0,0347	-0,0394	0,0030	0,0164	0,0062
16:00	-0,1298	-0,1319	-0,1433	-0,1691	-0,2192	-0,2476	0,0280	0,1124	0,0367
18:00	-0,0630	-0,0640	-0,0695	-0,0818	-0,1056	-0,1187	0,0181	0,0587	0,0171

As tensões S_1 atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -0,1298MPa, -0,1433MPa e -0,2192MPa.

6.3.1.5 - Análise da Tensão S_2

A Figura 6.19 mostra as variações da tensão S_2 atuando sobre o sistema de revestimento cerâmico e corresponde a uma tensão de compressão. O maior valor absoluto desta tensão ocorre na superfície do revestimento (nó 1944) é de -1,9630MPa, e o menor no nó 40 que é de -0,2026MPa, mostrado na Tabela 6.6.

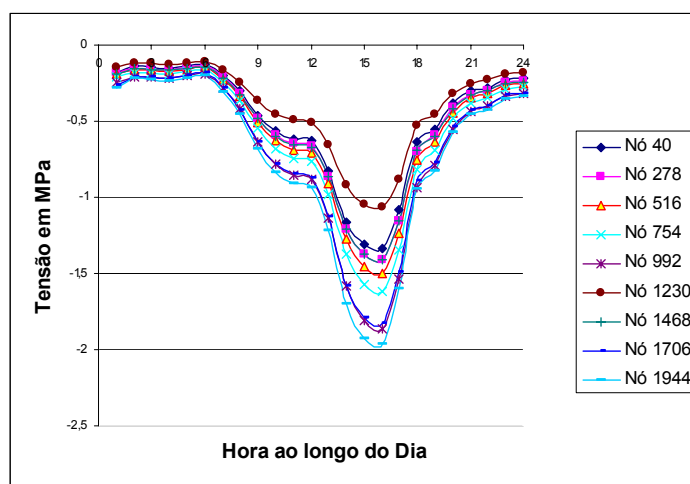


Figura 6.19 - Caso 1: Tensões S_2

Tabela 6.6 – Tensões S_2 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
7:00	-0,2026	-0,2114	-0,2242	-0,2434	-0,2833	-0,1651	-0,2177	-0,2858	-0,3085
16:00	-1,3369	-1,4086	-1,4965	-1,6173	-1,8606	-1,0678	-1,4084	-1,8285	-1,9630
18:00	-0,6367	-0,6962	-0,7549	-0,8206	-0,9368	-0,5303	-0,6954	-0,8919	-0,9488

A Figura 6.20 mostra o comportamento das tensões S_2 atuantes no sistema de revestimento cerâmico às 16h onde a máxima é de -1,9630MPa e a mínima ocorre à noite onde há o resfriamento do sistema de revestimento e é de -0,1455MPa, no nó 40.

As tensões de compressão S_2 atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -1,3369MPa, -1,4965MPa e -1,8606MPa.

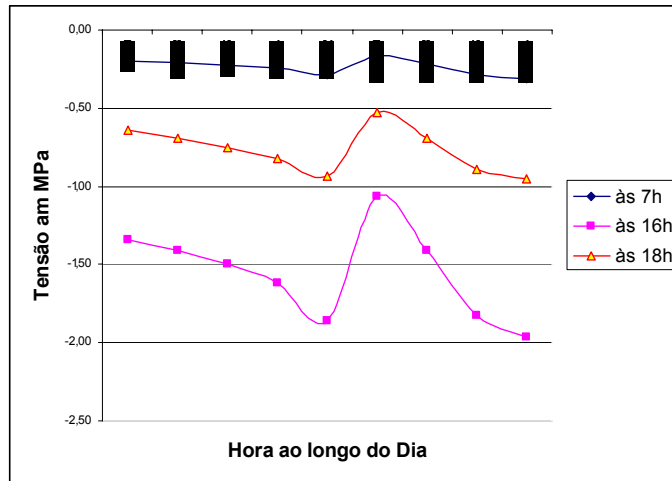


Figura 6.20 – Caso 1: Tensões S_2 às 7h, 16h e 18h

6.3.1.6 – Deformada e Concentração de Tensão

As Figuras 6.21 e 6.22 representam a deformada e a tensão equivalente de Von-Mises na região de interesse mostrada na Figura 6.2a. Nota-se uma grande compressão na região do rejunte e como consequência um nível mais elevado de concentração de tensão também na vizinhança do rejunte.

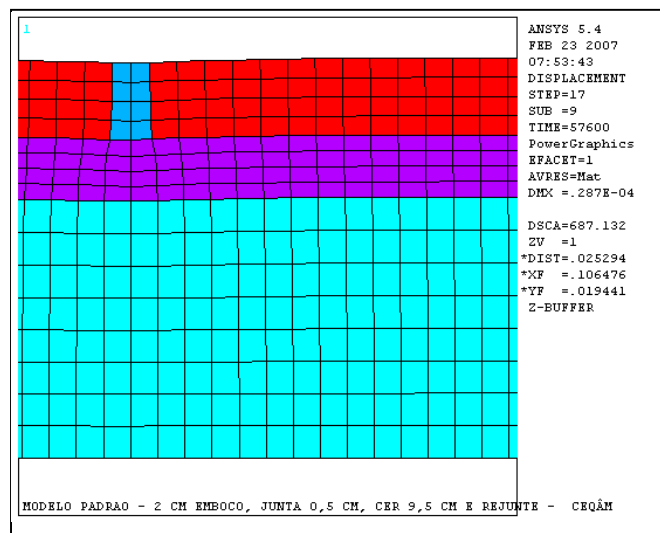


Figura 6.21 – Caso 1: Deformações - cerâmica clara - 16h

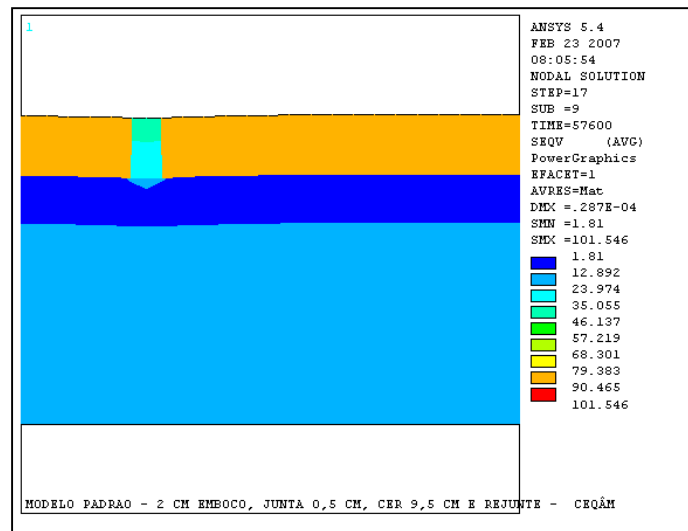


Figura 6.22 – Caso 1: Tensão (kgf/cm²) de Von-Mises - cerâmica clara - 16h

6.3.1.7 - Análise da Fadiga

Para a análise da fadiga do material argamassa de emboço, o enfoque descrito na seção 3.4.4 do Capítulo 3 e seção 4.4. do Capítulo 4 é aqui adotado. A curva de fadiga a ser usada é a curva experimental representada na Figura 4.19 com a Equação 4.8. As maiores e menores tensões principais S_1 e S_2 na argamassa de emboço estão na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Caso-1: Tensões (MPa) para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço

Pelas tensões normais	
$S_{1\text{máx}} = -0,2192$	$\Delta S = S_{1\text{máx}} - S_{1\text{mín}} = 0.2 \text{ MPa} \rightarrow$ Figura-4.18 $\rightarrow S < \sigma_{\text{Rf}}^c = 1,70 \text{ MPa}$. Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{10,81}$, ou seja, $N \rightarrow \infty$
$S_{1\text{mín}} = -0,0347$	
$S_{2\text{máx}} = -1,8606$	$\Delta S = S_{2\text{máx}} - S_{2\text{mín}} = 1.6 \text{ MPa} \rightarrow$ Figura 4.18 $\rightarrow N \approx 10^{6,04}$ Não há risco de ruptura por fadiga
$S_{2\text{mín}} = -0,2833$	

A Tabela 6.7 mostra as variações das tensões S_1 e S_2 com seus respectivos valores máximos e mínimos para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço. Como o valor da variação da tensão principal S_1 é menor que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), não existe risco de ruptura. Já para a tensão principal S_2 , cuja variação é maior que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), a camada de argamassa de emboço poderá sofrer ruptura por fadiga após $N \approx 10^{5,37}$.

6.3.2 – Caso 2

6.3.2.1 - Análise da Tensão Normal S_x

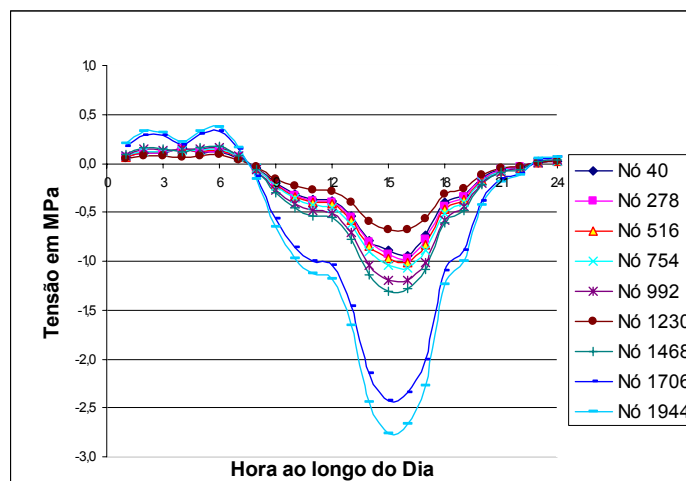


Figura 6.23 – Caso 2: Tensões S_x

As tensões S_x obtidas na análise numérica estão apresentadas na Figura 6.23 e, podemos observar que, além da predominância das tensões de compressão observadas no modelo, verificamos o aparecimento de tensões de tração atuando no período entre 23h e 7h. Isso ocorre devido à temperatura interna do ambiente (T_i) ser maior do que aquela aplicada para o Caso 1.

Analisando o comportamento da tensão S_x apresentada na Figura 6.23, observamos que os valores das tensões de tração variam de 0,0103MPa até 0,3721MPa, onde o menor valor ocorreu às 23h e o maior valor às 6h.

As tensões de compressão são apresentadas na Tabela 6.8, cujos valores foram obtidos para os horários das 8h, 16h e 18h, onde ocorrem o menor e o maior valor de tensão S_x .

Tabela 6.8 - Caso 2: Tensões S_x nos nós do modelo para as 8h, 16h e 18h

Hora	N640	N6278	N6516	N6754	N6992	N61230	N61468	N61706	N61944
08:00	-0,0499	-0,0468	-0,0462	-0,0487	-0,0572	-0,0342	-0,0685	-0,1336	-0,1556
16:00	-0,9396	-0,9684	-1,0074	-1,0669	-1,2024	-0,6744	-1,2821	-2,3481	-2,6643
18:00	-0,4025	-0,4379	-0,4717	-0,5084	-0,5741	-0,3207	-0,6049	-1,0998	-1,2356

As tensões S_x atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -0,9396MPa, -1,0074MPa e -1,2024MPa.

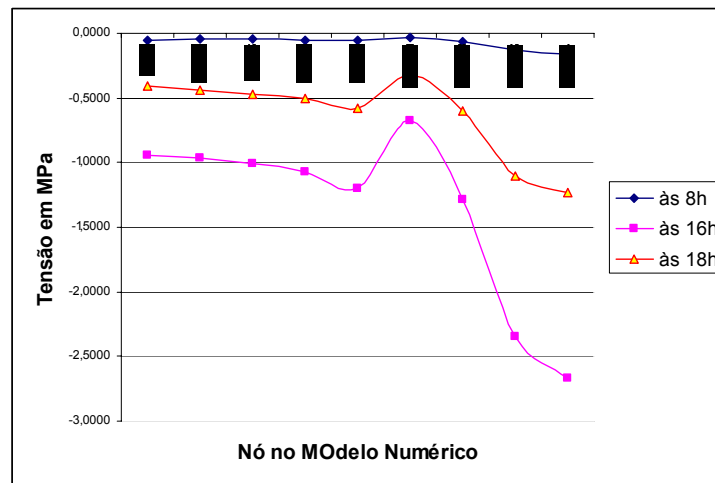


Figura 6.24 – Caso 2: Tensões S_x às 8h, 16h e 18h do dia

A Figura 6.24 apresenta o comportamento das tensões S_x na seção da argamassa de rejunte do sistema para os horários das 8h, 16h e 18h do dia. Podemos observar um comportamento muito semelhante ao do caso 1 para as tensões S_x . A variação da tensão de compressão vai de -0,0499MPa até -1,2024MPa nos nós que representam a argamassa de emboço. Do nó 992 até o nó 1468, observamos uma queda de tensão no nó 1230 devido ao baixo valor do módulo de elasticidade da argamassa colante. E, do nó 1468 até o nó 1944, verificamos uma grande intensidade na variação da tensão de compressão indo de -1,2821MPa até -2,6643MPa.

6.3.2.2 - Análise das tensões Normal S_y

Os resultados obtidos para as tensões normais ao longo do eixo Y para o modelo numérico, são mostrados na Figura 6.25.

Podemos observar que, no período entre 23h e 7h do dia existe uma tensão de compressão que varia de -0,00006MPa à -0,0119MPa, atuando na superfície externa do sistema (nós 1468 e 1706). Isso ocorre devido ao resfriamento durante a noite da superfície do sistema de revestimento cerâmico. Observamos, também, a existência de tensão de tração nesse

período, variando de 0,0005MPa à 0,0210MPa, observados nos nós 1944 e 1230, respectivamente.

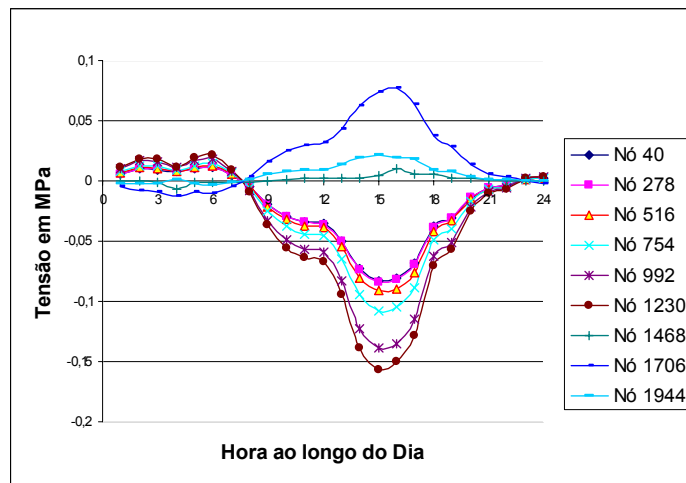


Figura 6.25 – Caso 2: Tensões S_y

Neste caso 2, a tensão de tração ocorre com mais intensidade quando há incidência de radiação solar, ou seja, com o aumento de temperatura. As tensões normais de tração variam de 0,0008MPa à 0,0771MPa. Na região entre o emboço e substrato (nó 40) e o emboço com argamassa colante (nó 992), as tensões normais ao longo do eixo Y se comportam como tensão de compressão, quando há incidência solar, variando de -0,0044MPa à -0,1390MPa.

A Tabela 6.9 mostra os valores obtidos para os horários onde ocorre radiação solar e onde se observa o menor e o maior valor para as tensões S_y .

Tabela 6.9 - Caso 2: Tensões S_y nos nós do modelo para as 8h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
08:00	-0,0045	-0,0045	-0,0049	-0,0059	-0,0077	-0,0088	-0,0007	0,0031	0,0014
16:00	-0,0811	-0,0823	-0,0892	-0,1049	-0,1349	-0,1505	0,0103	0,0771	0,0190
18:00	-0,0377	-0,0383	-0,0415	-0,0488	-0,0628	-0,0700	0,0058	0,0371	0,0092

As tensões S_y atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -0,0811MPa, -0,0892MPa e -0,1349MPa.

A Figura 6.26 apresenta o comportamento das tensões S_y na seção da argamassa de rejunte do sistema para os horários das 8h, 16h e 18h do dia. Neste caso, observa-se que a tensão

S_y tem um crescimento de variação pouco acentuado até o nó 992. Essa variação da tensão de compressão é de -0,0045MPa até -0,1349MPa. Do nó 992 até o nó 1468, observamos uma queda de tensão no nó 1230 devido ao baixo valor do módulo de elasticidade da argamassa colante. Entretanto, do nó 1468 até o nó 1944, que representa a camada de rejunte externa do sistema, verificamos uma variação da tensão de tração indo de 0,0103MPa até 0,0190MPa.

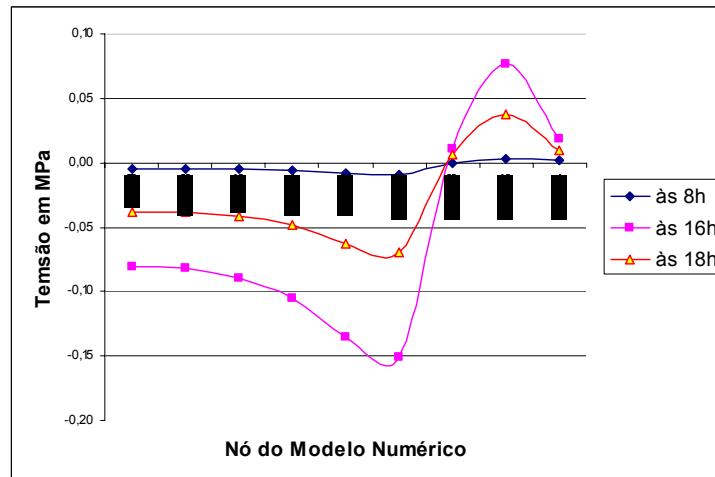


Figura 6.26 – Caso 2: Tensões S_y às 8h, 16h e 18h

6.3.2.3 - Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}

A Figura 6.27 mostra o comportamento das tensões de cisalhamento S_{xy} da seção da argamassa de rejunte do sistema de revestimento para o caso 2.

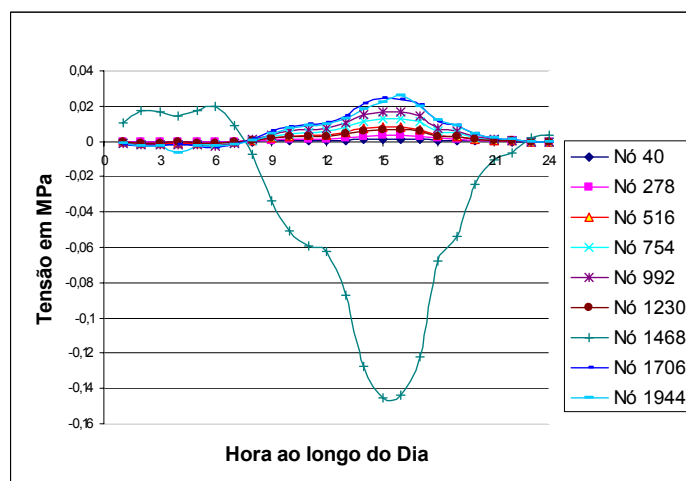


Figura 6.27 – Caso 2: Tensões S_{xy}

Entre as 23h e 7h, quando o sistema de revestimento não está recebendo radiação solar, ocorre uma mudança de comportamento no sistema causada pelo processo de resfriamento. Ou seja, o sistema tem um comportamento de retração que pode ser observado pelas tensões na Figura 6.27. A temperatura interna de 25,0°C é outro fator que influencia neste fenômeno, pois gera uma menor condução de calor interno no sistema.

A maior variação de tensão de cisalhamento S_{xy} no sistema para este caso, ocorreu às 16h nos nós 1944 e 1468, com os valores de 0,0260MPa e -0,1436MPa, respectivamente. Na interface do emboço com substrato (nó 40), a tensão de cisalhamento é, praticamente, nula (0,00006MPa) e na interface da camada de emboço com argamassa colante (nó 992), a tensão de cisalhamento correspondente é de 0,0169MPa, como mostrado na Tabela 6.10 e na Figura 6.28.

Tabela 6.10 - Caso 2: Tensões S_{xy} nos nós do modelo para as 8h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
08:00	0,00006	0,0002	0,0004	0,0007	0,0009	0,0004	-0,0075	0,0012	0,0007
16:00	0,0012	0,0035	0,0083	0,0132	0,0169	0,0068	-0,1436	0,0239	0,0260
18:00	0,0005	0,0016	0,0038	0,0061	0,0078	0,0030	-0,0679	0,0115	0,0123

As tensões de cisalhamento S_{xy} atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são respectivamente 0,0012MPa, 0,0083MPa e 0,0169MPa.

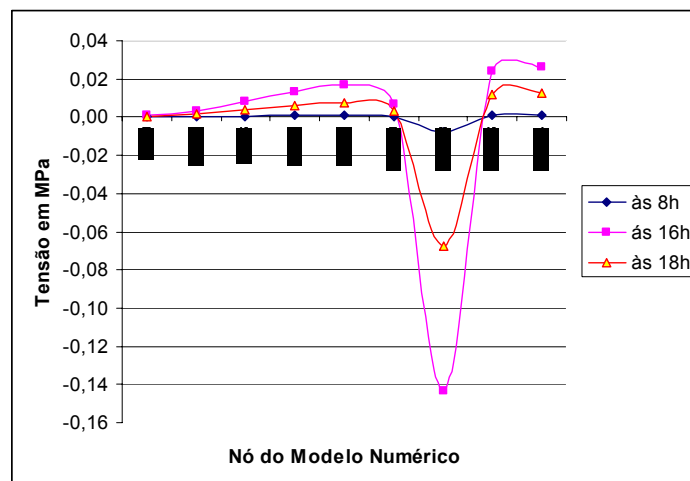


Figura 6.28 – Caso 2: Tensões S_{xy} às 8h, 16h e 18h

6.3.2.4 - Análise da Tensão S_1

A Figura 6.29 mostra as variações das tensões S_1 que correspondem à tensão de tração na região da superfície do revestimento e na interface do rejunte com a argamassa colante, nós 1944 e 1468, respectivamente. As tensões de tração, às 16h, são de 0,0193MPa no nó 1944 e 0,0261MPa no nó 1468. A tensão interna no rejunte é de 0,0773MPa (nó 1706). O sinal da tensão S_1 muda para compressão na parte interna do sistema de revestimento cerâmico e varia de -0,0045MPa a -0,1346MPa, como mostrado na Tabela 6.11.

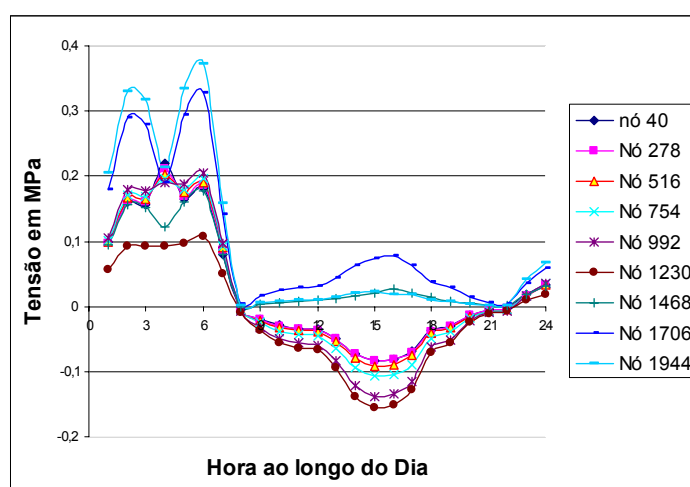


Figura 6.29 – Caso 2: Tensões S_1

A Figura 6.30 apresenta o comportamento das tensões S_1 atuantes no sistema de revestimento quando há incidência da radiação solar (I_g), onde se verifica a tensão de tração no valor de 0,0773MPa e tensão de compressão de -0,1504MPa, isso para às 16h, onde a incidência solar alcança seu valor máximo.

Tabela 6.11 - Caso 2: Tensões S_1 nos nós do modelo para as 8h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
08:00	-0,0045	-0,0045	-0,0049	-0,0059	-0,0077	-0,0088	0,0001	0,0031	0,0014
16:00	-0,0811	-0,0823	-0,0892	-0,1047	-0,1346	-0,1504	0,0261	0,0773	0,0193
18:00	-0,0377	-0,0383	-0,0415	-0,0487	-0,0627	-0,0700	0,0133	0,0372	0,0093

As tensões S_1 atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -0,0811MPa, -0,0892MPa e -0,1346MPa.

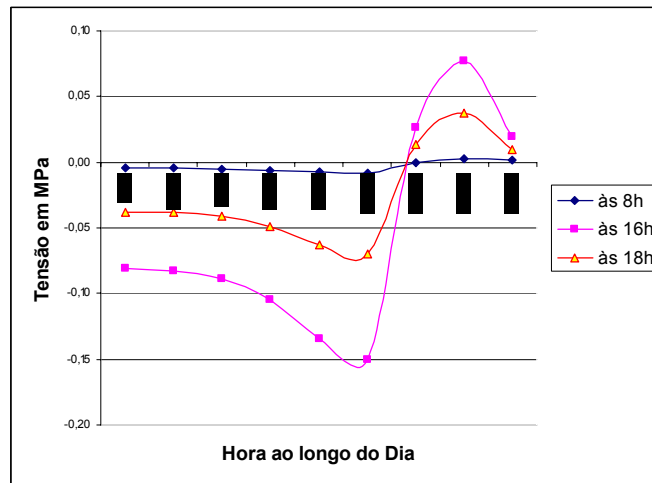


Figura 6.30 – Caso 2: Tensões S_1 às 8h, 16h e 18h

6.3.2.5 - Análise da Tensão S_2

A Figura 6.31 mostra o comportamento das tensões S_2 atuando sobre o sistema de revestimento cerâmico de um modo atípico, ou seja, observa-se tensão de tração quando não há incidência solar (à noite) e tensão de compressão ao longo do dia. Isso ocorre também devido a pequena perda de calor por condução e ao resfriamento das peças cerâmicas.

A Tabela 6.12 apresenta as tensões de compressão e o seu valor máximo apresentado ocorreu no nó 1944 e foi de -1,2263MPa. Já o maior valor da tensão de tração ocorreu no nó 40 as 4h cujo valor foi de 0,1597MPa.

As tensões S_2 atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -0,9396MPa, -1,0075MPa e -1,2026MPa.

Tabela 6.12 - Caso 2: Tensões S_2 nos nós do modelo para as 8h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
08:00	-0,0499	-0,0468	-0,0462	-0,0487	-0,0572	-0,0342	-0,0461	-0,0619	-0,0682
16:00	-0,9396	-0,9684	-1,0075	-1,0671	-1,2026	-0,6745	-0,8963	-1,1459	-1,2263
18:00	-0,4025	-0,4379	-0,4717	-0,5085	-0,5742	-0,3208	-0,4216	-0,5356	-0,5679

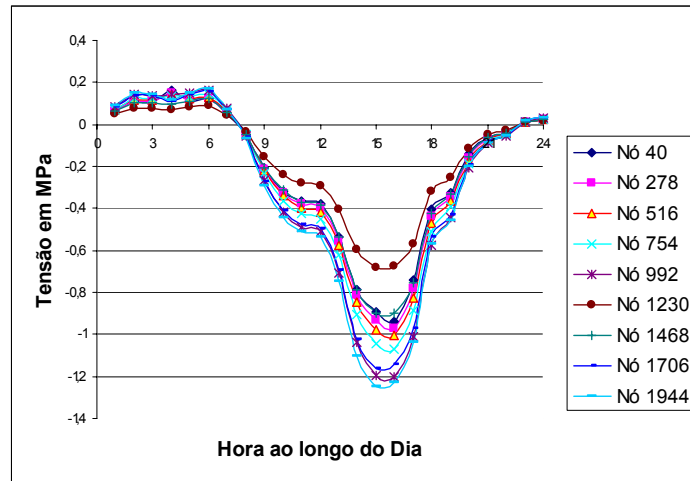


Figura 6.31 – Caso 2: Tensões S_2

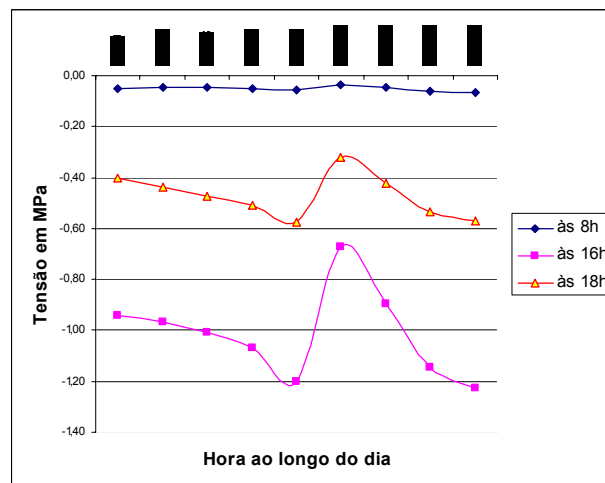


Figura 6.32 – Caso 2: Tensões S_2 às 8h, 16h e 18h

A Figura 6.32, mostra as tensões S_2 , onde há incidência de radiação solar. Nota-se que às 8h da manhã as tensões atuantes no sistema de revestimento são praticamente nulas, ou seja, o sistema de revestimento se encontra em equilíbrio.

6.3.2.6 – Deformada e Concentração de Tensão

A Figura 6.33 representa a deformada e a Figura 6.34 mostra, para o caso 2, os mesmos comportamentos do caso 1 para a tensão equivalente de Von-Mises na região de interesse mostrada na Figura 6.2a. Nota-se uma grande compressão na região do rejunte e, por conseqüência, um nível mais elevado de concentração de tensão também na vizinhança do rejunte.

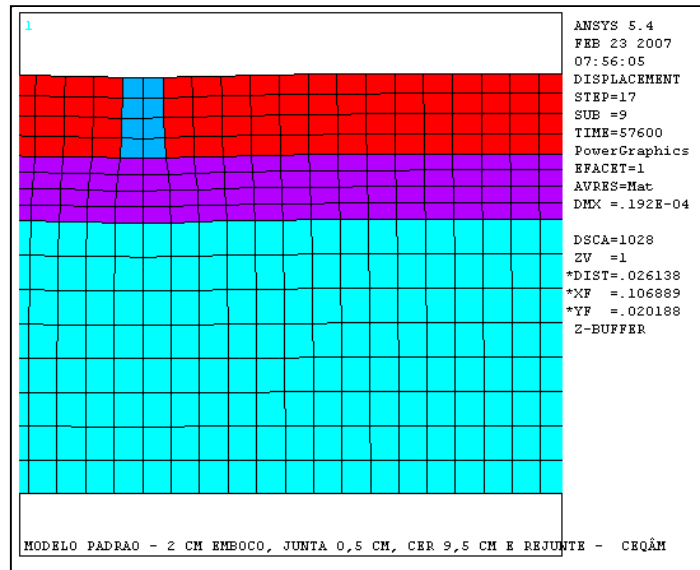


Figura 6. 33 – Caso 2: Deformações - cerâmica clara - 16h

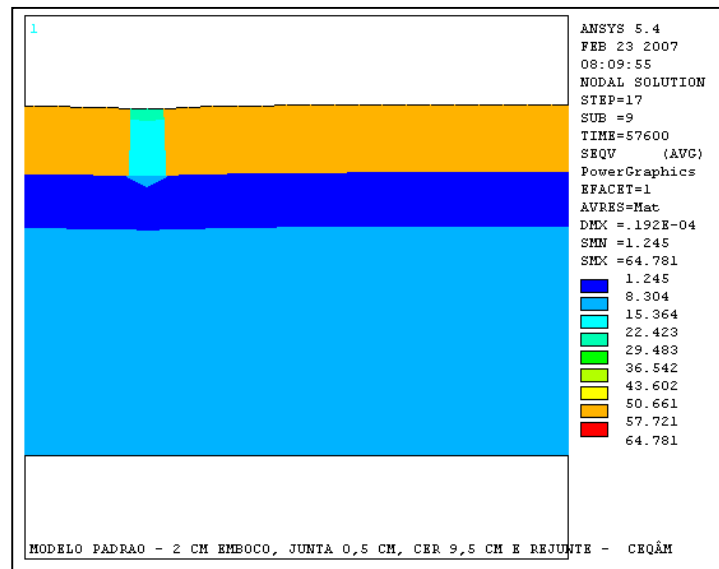


Figura 6.34 – Caso 2: Tensão (kgf/cm²) de Von-Mises - cerâmica clara - 16h

6.3.2.7 - Análise da Fadiga

Para a análise da fadiga do material argamassa de emboço, o enfoque descrito no Capítulo 3 (seção 3.4.4) e Capítulo 4 (seção 4.4) é aqui adotado. A curva de fadiga a ser usada é a curva experimental da Figura 4.19 com a Equação 4.8. As maiores e menores tensões principais S_1 e S_2 na argamassa de emboço estão na Tabela 6.13.

Tabela 6.13: Caso-2: Tensões (MPa) para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço

Pelas tensões normais	
$S_{1\text{máx}} = -0,1346$	$\Delta S = S_{1\text{máx}} - S_{1\text{mín}} = 0.1 \text{ MPa} \rightarrow$ Figura-4.18 $\rightarrow S < \sigma_{Rf}^c = 1,70 \text{ MPa}$. Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{9,87}$, ou seja, $N \rightarrow \infty$
$S_{1\text{mín}} = -0,0077$	
$S_{2\text{máx}} = -1,2026$	$\Delta S = S_{2\text{máx}} - S_{2\text{mín}} = 1.1 \text{ MPa} \rightarrow$ Figura-4.18 $\rightarrow S < \sigma_{Rf}^c = 1,70 \text{ MPa}$. Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{7,05}$, ou seja, $N \rightarrow \infty$
$S_{2\text{mín}} = -0,0572$	

A Tabela 6.13 mostra, para o caso 2, as tensões S_1 e S_2 com seus respectivos valores máximos e mínimos para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço. Como os valores da variação das tensões principais S_1 e S_2 são menores que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), não existe risco de ruptura.

6.3.3 – Caso 3

6.3.3.1 - Análise da Tensão Normal S_x

As tensões S_x obtidas na análise numérica estão apresentadas na Figura 6.35 e, podemos observar que todas as tensões no modelo são de compressão. A tensão S_x para o caso 3 tem comportamento semelhante ao Caso 1.

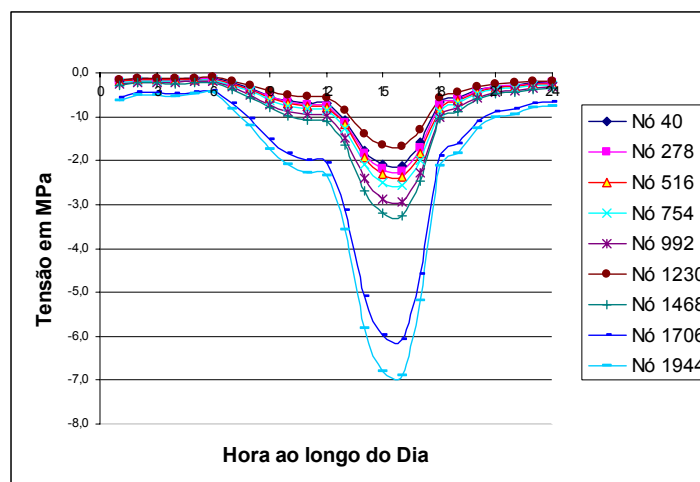


Figura 6.35 – Caso 3: Tensões S_x

A Tabela 6.14 apresenta os valores de tensão normal S_x considerando os horários do dia com radiação solar, como foi citado no Caso 1.

Tabela 6.14 – Caso 3: Tensões S_x nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
07:00	-0,2369	-0,2459	-0,2596	-0,2815	-0,3276	-0,1911	-0,3729	-0,7087	-0,8094
16:00	-2,1183	-2,2308	-2,3686	-2,5584	-2,9416	-1,6873	-3,2520	-6,0813	-6,9084
18:00	-0,6518	-0,7380	-0,8145	-0,8887	-1,0059	-0,5613	-1,0539	-1,9090	-2,1304

As tensões S_x atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -2,1183MPa, -2,3686MPa e -2,9416MPa.

A Figura 6.36 apresenta o comportamento das tensões S_x na seção da argamassa de rejunte do sistema para os horários das 7h, 16h e 18h do dia. Observa-se que, a tensão S_x tem um crescimento de variação muito pequeno até o nó 992. Essa variação da tensão de compressão vai de -0,3276MPa até -2,9416MPa. Do nó 992 até o nó 1468, também se observa uma queda de tensão no nó 1230, devido ao baixo valor do módulo de elasticidade da argamassa colante. E, do nó 1468 até o nó 1944, verificamos uma grande intensidade na variação da tensão de compressão indo de -0,3729MPa até -6,9084MPa.

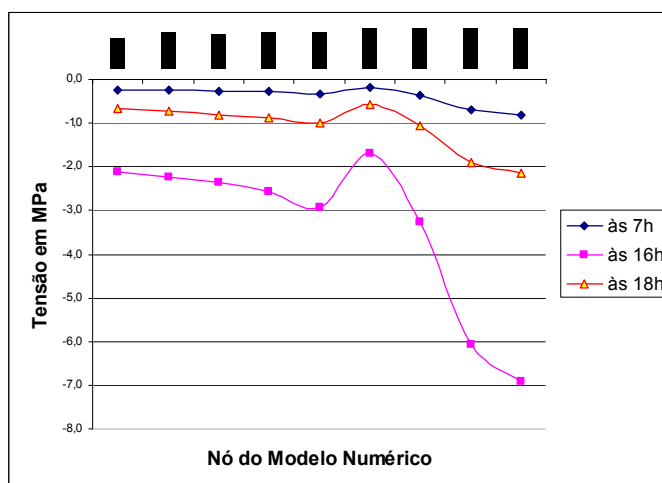


Figura 6.36 – Caso 3: Tensões S_x às 7h, 16h e 18h

6.3.3.2 - Análise da Tensão Normal S_y

Os resultados obtidos para as tensões normais ao longo do eixo Y para o modelo numérico, são mostrados na Figura 6.37.

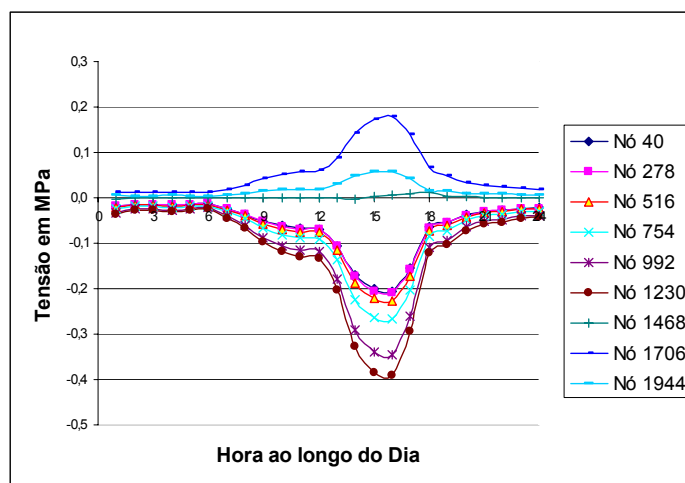


Figura 6.37 – Caso 3: Tensões S_y

Na Figura 6.37, observa-se, inicialmente, que na região do rejunte externo, representado no modelo através do nó 1944, todas as tensões são de tração e variam de 0,0040MPa à 0,0574MPa, ao longo do dia. Já nas interfaces da argamassa colante e emboço (nó 992) e o emboço com o substrato (nó 40), as tensões normais ao longo do eixo Y se comportam como tensão de compressão, e seus valores são -0,3468MPa e -0,2052MPa, respectivamente.

A Tabela 6.15 mostra os valores obtidos para os horários onde ocorre radiação solar e onde se observa o menor e o maior valor para as tensões S_y .

Tabela 6.15 – Caso 3: Tensões S_y nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
7:00	-0,0237	-0,0240	-0,0262	-0,0310	-0,0404	-0,0458	-0,0012	0,0189	0,0071
16:00	-0,2052	-0,2085	-0,2266	-0,2675	-0,3468	-0,3912	0,0051	0,1775	0,0574
18:00	-0,0651	-0,0662	-0,0717	-0,0844	-0,1085	-0,1209	0,0109	0,0652	0,0165

As tensões S_y atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -0,2052MPa, -0,2266MPa e -0,3468MPa.

A Figura 6.38 apresenta o comportamento das tensões S_y durante o dia. Observa-se que a tensão S_y tem um crescimento de variação pouco acentuado até o nó 992. Essa variação da tensão de compressão varia de -0,0404MPa até -0,3468MPa. Entre os nós 992 e 1468, existe uma queda de tensão de compressão até o nó 1230, devido ao baixo valor do módulo de elasticidade da argamassa colante. E, do nó 1468 até o nó 1944, que representa a camada de rejunte externo do sistema, verificamos uma grande intensidade na variação da tensão de tração indo de 0,0071MPa até 0,0574MPa.

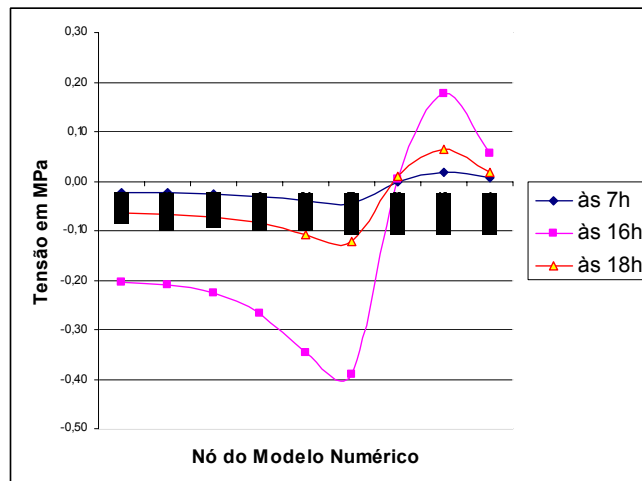


Figura 6.38 – Caso 3: Tensões S_y às 7h, 16h e 18h

6.3.3.3 - Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}

A Figura 6.39 mostra o comportamento das tensões de cisalhamento S_{xy} da seção da argamassa de rejunte do sistema de revestimento para o caso 3.

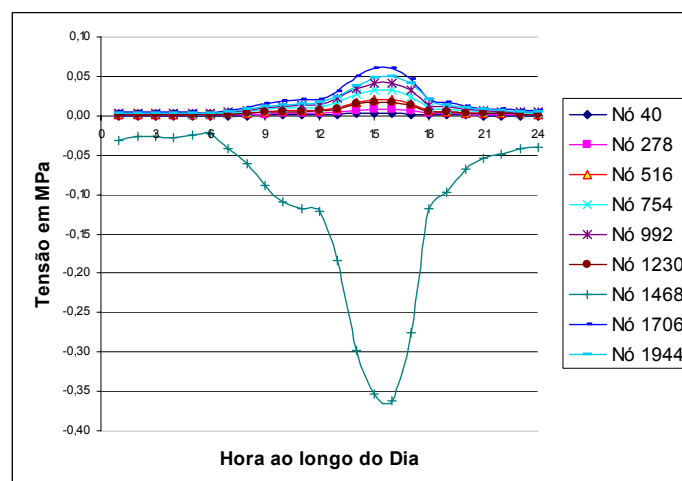


Figura 6.39 – Caso 3: Tensões S_{xy}

A maior variação de tensão de cisalhamento S_{xy} no sistema para este caso, ocorreu às 16h, nos nós 1944 e 1468, com as tensões de 0,0507MPa e -0,3614MPa, respectivamente. Na interface do emboço com substrato (nó 40), a tensão de cisalhamento observada foi de 0,0028MPa, e na interface da camada de emboço com argamassa colante (nó 992), foi de 0,0418MPa, como mostrado na Tabela 6.16 e Figura 6.40.

Tabela 6.16 - Caso 3: Tensões S_{xy} nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
7:00	0,0003	0,0010	0,0023	0,0037	0,0048	0,0020	-0,0412	0,0069	0,0047
16:00	0,0028	0,0085	0,0200	0,0324	0,0418	0,0172	-0,3614	0,0610	0,0507
18:00	0,0009	0,0028	0,0065	0,0105	0,0133	0,0050	-0,1184	0,0203	0,0211

As tensões de cisalhamento S_{xy} atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são respectivamente 0,0028MPa, 0,0200MPa e 0,0418MPa.

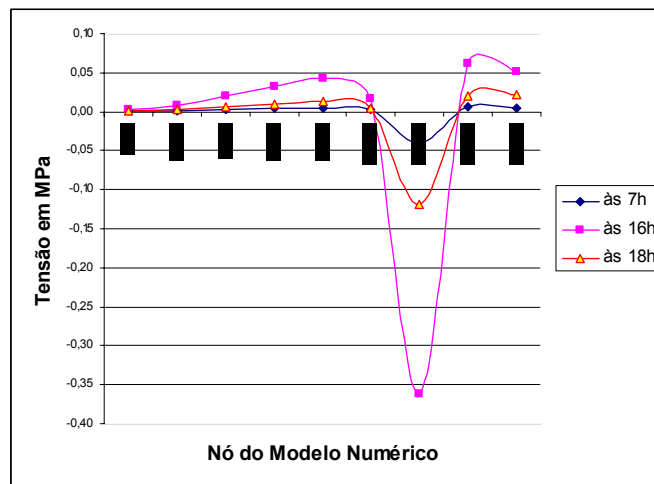


Figura 6.40 – Caso 3: Tensões S_{xy} às 7h, 16h e 18h

6.3.3.4 - Análise da Tensão S_1

A Figura 6.41 mostra que o comportamento das tensões S_1 para o caso 3 é semelhante ao do caso 1, com tensões de tração e compressão no valor de 0,1781MPa e -0,3910MPa, respectivamente, na cerâmica e na argamassa colante (nós 1706 e 1230), conforme a Tabela 6.17.

Tabela 6.17 - Caso 3: Tensões S_1 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
7:00	-0,0237	-0,0240	-0,0262	-0,0309	-0,0403	-0,0458	0,0033	0,0189	0,0072
16:00	-0,2052	-0,2084	-0,2264	-0,2671	-0,3461	-0,3910	0,0447	0,1781	0,0577
18:00	-0,0651	-0,0661	-0,0717	-0,0842	-0,1083	-0,1209	0,0239	0,0655	0,0167

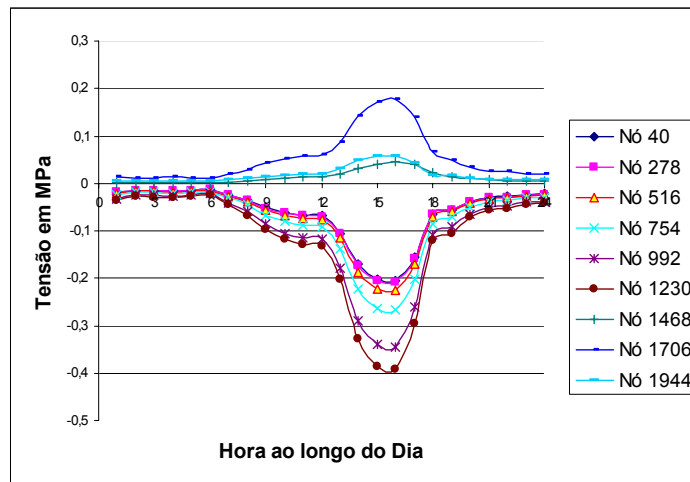


Figura 6.41 – Caso 3: Tensões S_1

As tensões S_1 atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -0,2052MPa, -0,2264MPa e -0,3461MPa.

A Figura 6.42, mostra as tensões S_1 atuantes no sistema de revestimento quando há incidência solar (I_g), mostrando que há tensão de tração na seção externa do revestimento e compressão na parte interna do mesmo.

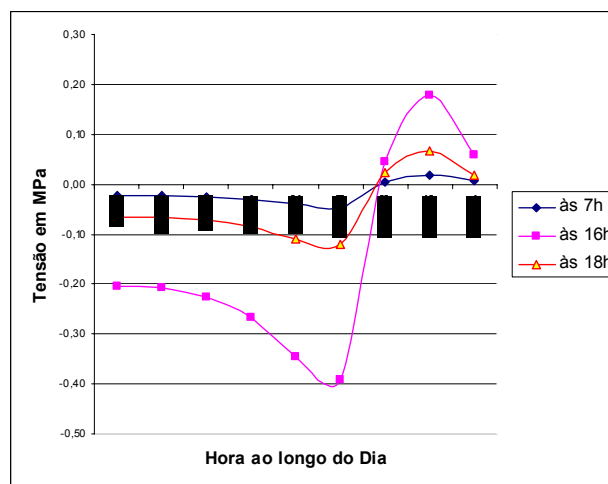


Figura 6.42 – Caso 3: Tensões S_1 às 7h, 16h e 18h

6.3.3.5 - Análise da Tensão S_2

A Figura 6.43 mostra as variações da tensão S_2 atuando sobre o sistema de revestimento cerâmico para o caso 3. Seu comportamento é semelhante ao Caso1. O maior valor da tensão de compressão ocorreu quando há incidência da radiação solar e foi observado na superfície do revestimento (nó 1944) com o valor de -3,1016MPa. O menor valor da tensão de compressão ocorreu à noite, onde há o resfriamento, no nó 40 e foi de -0,2369MPa, conforme mostrado na Tabela 6.18.

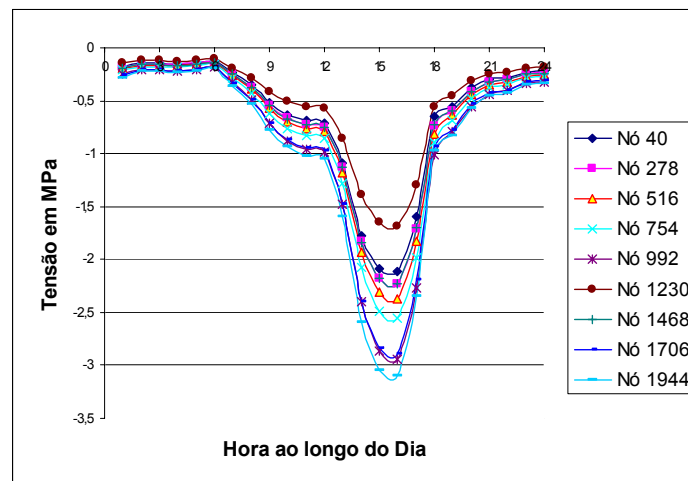


Figura 6.43 – Caso 3: Tensões S_2

Tabela 6.18 - Caso 3: Tensões S_2 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
7:00	-0,2369	-0,2459	-0,2597	-0,2815	-0,3277	-0,1911	-0,2524	-0,3317	-0,3583
16:00	-2,1183	-2,2308	-2,3688	-2,5588	-2,9422	-1,6875	-2,2262	-2,8894	-3,1016
18:00	-0,6518	-0,7380	-0,8145	-0,8888	-1,0061	-0,5613	-0,7323	-0,9271	-0,9771

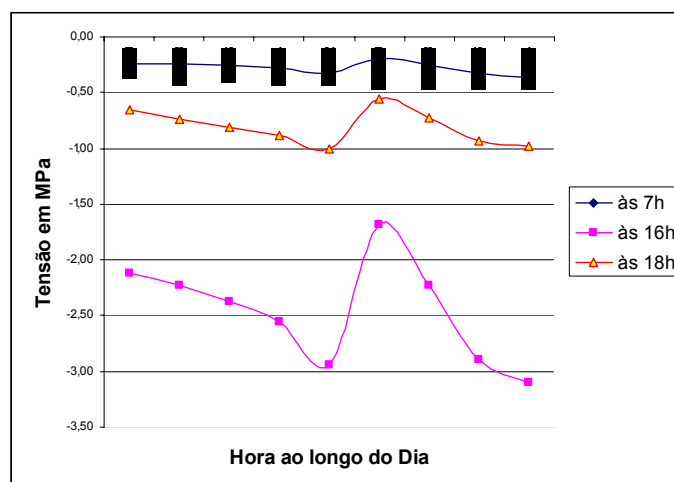


Figura 6.44 – Caso 3: Tensões S_2 às 7h, 16h e 18h

6.3.3.6 – Deformada e Concentração de Tensão

A Figura 6.45 representa a deformada e a Figura 6.46 representa a tensão equivalente de Von-Mises na região de interesse mostrada na Figura 6.2a. Nota-se uma grande compressão na região do rejunte e, por consequência, um nível mais elevado de concentração de tensão também na vizinhança do rejunte.

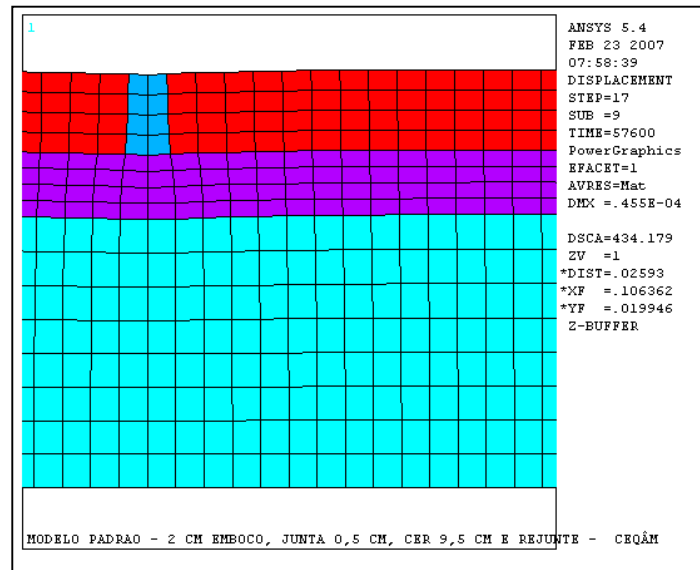


Figura 6.45 – Caso 3: Deformações - cerâmica escura - 16h

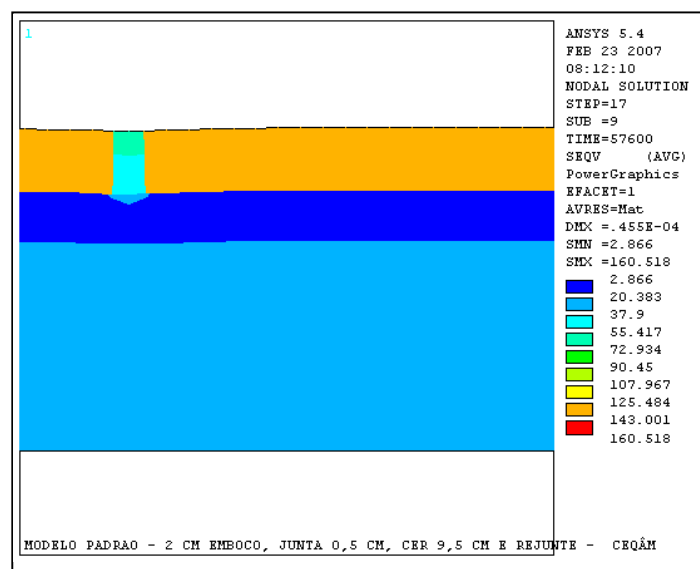


Figura 6.46 – Caso 3: Tensão (kgf/cm²) de Von-Mises - cerâmica escura - 16h

6.3.3.7 - Análise da Fadiga

Para a análise da fadiga do material argamassa de emboço, o enfoque descrito no Capítulo 3 (seção 3.4.4) e Capítulo 4 (seção 4.4) é aqui adotado. A curva de fadiga a ser usada é a curva experimental da Figura 4.19 com a Equação 4.8. As maiores e menores tensões principais S_1 e S_2 na argamassa de emboço estão na Tabela 6.19.

Tabela 6.19: Caso-3: Tensões (MPa) para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço

Pelas tensões normais	
$S_{1\text{máx}} = -0,3461$	$\Delta S = S_{1\text{máx}} - S_{1\text{mín}} = 0.3 \text{ MPa} \rightarrow$ Figura-4.18 $\rightarrow S < \sigma_{\text{Rf}}^c = 1,70 \text{ MPa}$. Não há risco de ruptura por fadiga $\rightarrow N \approx 10^{9,95}$, ou seja, $N \rightarrow \infty$
$S_{1\text{mín}} = -0,0403$	
$S_{2\text{máx}} = -2,9422$	$\Delta S = S_{2\text{máx}} - S_{2\text{mín}} = 2.6 \text{ MPa} \rightarrow$ Figura-4.18 $\rightarrow S > \sigma_{\text{Rf}}^c = 1,70 \text{ MPa}$. $N \approx 10^{2,8}$ (Rompe com 1 ano e 7 meses ou 631 dias) para risco de ruptura por fadiga.
$S_{2\text{mín}} = -0,3277$	

A Tabela 6.19 mostra, para o caso 3, as tensões S_1 e S_2 com seus respectivos valores máximos e mínimos para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço. Para a tensão principal S_1 que é menor que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c) não existe risco de ruptura. Já para a tensão principal S_2 , que é bem maior que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), a camada de argamassa de emboço sofrerá ruptura por fadiga após 1 ano e 7 meses ou 631 dias depois de sua aplicação.

6.3.4 – Caso 4.

6.3.4.1 - Análise da Tensão Normal S_x

As tensões S_x , obtidas na análise numérica para o caso 4, estão apresentadas na Figura 6.47 e podemos observar que seu comportamento é bastante semelhante ao caso 2.

Igualmente ao caso 2, os valores das tensões de tração variam de 0,0103MPa até 0,3721MPa, onde o menor valor ocorreu às 23h e o maior valor às 6h, nos nós 516 e 1944, respectivamente. Isso ocorre devido à ausência de radiação solar e, também, porque ambos os casos 2 e 4 consideram a mesma temperatura interna de 25,0°C.

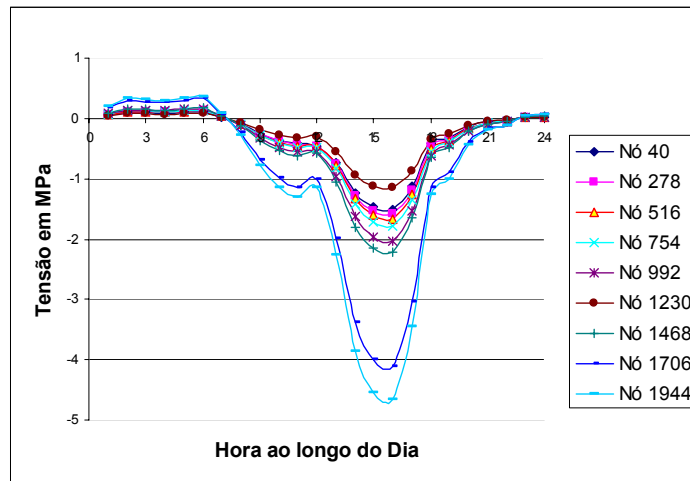


Figura 6.47 – Caso 4: Tensões S_x

Apresentamos na Tabela 6.20 os valores obtidos para os horários das 7h, 16h e 18h onde são registrados os menores e maiores valores da tensão S_x .

Tabela 6.20 – Caso 4: Tensões S_x nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
07:00	0,0254	0,0315	0,0361	0,0395	0,0435	0,0232	0,0418	0,0717	0,0777
16:00	-1,5101	-1,5757	-1,6591	-1,7779	-2,0286	-1,1539	-2,2130	-4,1072	-4,6650
18:00	-0,4143	-0,4691	-0,5157	-0,5585	-0,6247	-0,3433	-0,6372	-1,1355	-1,2616

As tensões S_x atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -1,5101MPa, -1,6591MPa e -2,0286MPa.

A Figura 6.48 apresenta o comportamento das tensões S_x na seção da argamassa de rejunte do sistema para os horários das 7h, 16h e 18h do dia. Observa-se que a tensão S_x tem um crescimento de variação muito pequeno até o nó 992. Essa variação da tensão de tração é praticamente nula e a tensão máxima de compressão é de -2,0286MPa, no nó 992. Do nó 992 até o nó 1468, observamos uma queda de tensão no nó 1230 devido ao baixo valor do módulo de elasticidade da argamassa colante. E, do nó 1468 até o nó 1944, temos uma grande intensidade na variação da tensão de compressão indo de -2,2130MPa até -4,6650MPa.

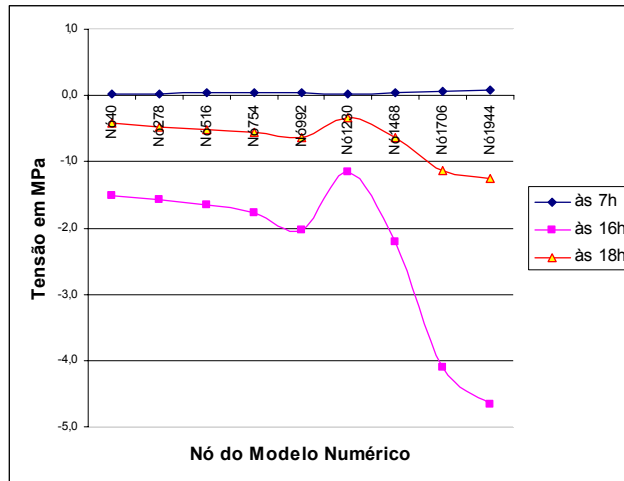


Figura 6.48 – Caso 4: Tensões S_x às 7h, 16h e 18h

6.3.4.2 - Análise da Tensão Normal S_y

Os resultados obtidos para as tensões normais ao longo do eixo Y para o modelo numérico no caso 4, são mostrados na Figura 6.49.

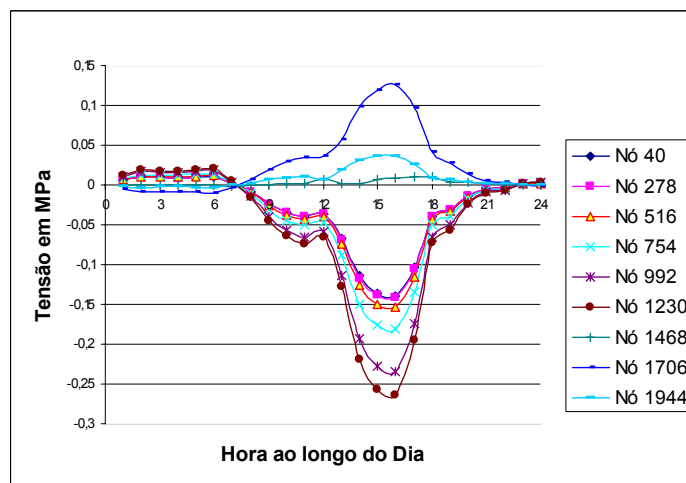


Figura 6.49 – Caso 4: Tensões S_y

Podemos observar que, no período entre 23h e 7h do dia, existe uma tensão de compressão que varia de $-0,0004\text{MPa}$ à $-0,0099\text{MPa}$, atuando na superfície externa do sistema. Isso ocorre devido ao resfriamento da superfície do sistema de revestimento cerâmico. A tensão de tração na superfície ocorre quando há incidência de radiação solar, ou seja, um aumento de temperatura. As tensões de tração variam de $0,0009\text{MPa}$ à $0,1252\text{MPa}$ na superfície do sistema de revestimento.

Nas interfaces da argamassa colante e emboço e o emboço com o substrato, as tensões normais ao longo do eixo Y se comportam como tensão de tração no período entre 23h e 7h e variam de 0,0011MPa à 0,0187MPa. No restante do dia onde ocorre incidência solar, a tensão de compressão varia de -0,0005MPa à -0,2639MPa.

A Tabela 6.21 mostra os valores para as tensões S_y obtidos para os horários onde ocorre radiação solar.

Tabela 6.21 – Caso 4: Tensões S_y nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
07:00	0,0025	0,0026	0,0028	0,0032	0,0041	0,0044	-0,0011	-0,0031	-0,0005
16:00	-0,1398	-0,1420	-0,1542	-0,1817	-0,2349	-0,2639	0,0087	0,1252	0,0367
18:00	-0,0393	-0,0399	-0,0432	-0,0506	-0,0647	-0,0716	0,0096	0,0421	0,0089

As tensões S_y atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -0,1398MPa, -0,1542MPa e -0,2349MPa.

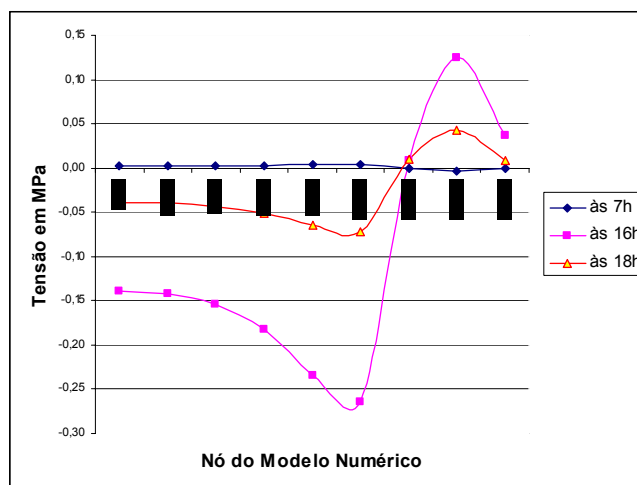


Figura 6.50 – Caso 4: Tensões S_y às 7h, 16h e 18h

A Figura 6.50 mostra que o comportamento das tensões S_y na seção da argamassa de rejunte do sistema é semelhante ao caso 3. As tensões de tração e compressão variam de 0,0041MPa até -0,2349MPa no nó 992. Do nó 992 até o nó 1468, observamos uma queda de tensão à compressão no nó 1230, devido ao baixo valor do módulo de elasticidade da argamassa colante. E, do nó 1468 até o nó 1944, verificamos uma variação da tensão de tração indo de 0,0087MPa até 0,0367MPa.

6.3.4.3 - Análise da Tensão de Cisalhamento S_{xy}

A Figura 6.51 mostra o comportamento das tensões de cisalhamento S_{xy} da seção da argamassa de rejunte do sistema de revestimento para o caso 4.

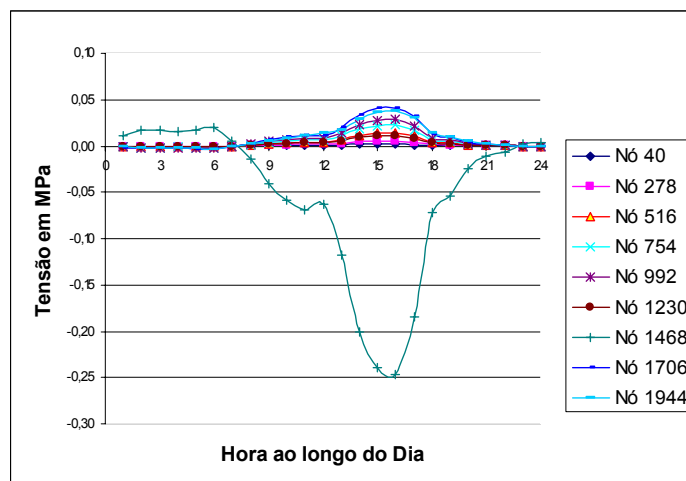


Figura 6.51 – Caso 4: Tensões S_{xy}

O comportamento da tensão de cisalhamento S_{xy} para este caso é semelhante ao caso 2, entretanto, com valores de tensões de amplitude menor. Isso ocorre devido ao alto índice de absorção térmica da cerâmica escura, já que nos dois casos a temperatura interna aplicada no sistema foi a mesma (25,0°C).

A maior tensão de cisalhamento S_{xy} no sistema (16h), para os nós 1944 e 1468, foi de 0,0383MPa e -0,2466MPa, respectivamente. Na interface do emboço com substrato, a tensão de cisalhamento é praticamente nula (0,0020MPa) e na interface da camada de emboço com argamassa colante, a tensão de cisalhamento no nó 992 é de 0,0287MPa, como mostrado na Tabela 6.22 e Figura 6.52.

As tensões de cisalhamento S_{xy} atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, 0,0020MPa, 0,0139MPa e 0,0287MPa.

Tabela 6.22 - Caso 4: Tensões S_{xy} nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
07:00	-4E-05	-1E-04	-3E-04	-4E-04	-5E-04	-2E-04	5E-03	-8E-04	-1E-03
16:00	0,0020	0,0059	0,0139	0,0223	0,0287	0,0117	-0,2466	0,0414	0,0383
18:00	0,0006	0,0017	0,0041	0,0065	0,0081	0,0030	-0,0720	0,0123	0,0148

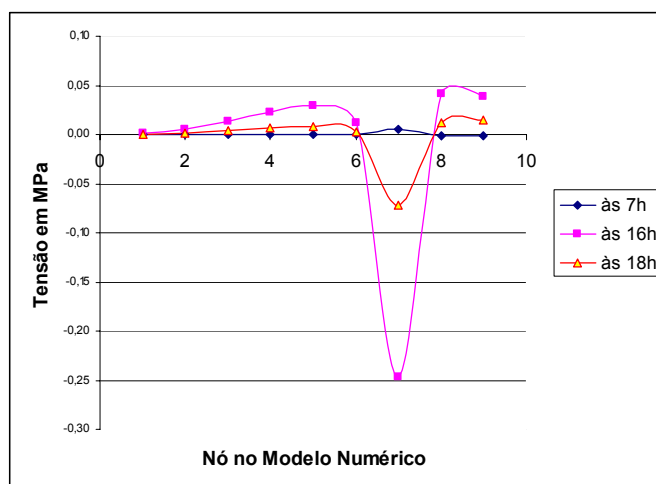


Figura 6.52 – Caso 4: Tensões S_{xy} às 7h, 16h e 18h

6.3.4.4 - Análise da Tensão S_1

A Figura 6.53 mostra as variações das tensões S_1 para o caso 4 e é semelhante ao caso 2. As tensões de tração variam de 0,0008MPa a 0,3721MPa e a tensão máxima interna no rejunte é de 0,1256MPa. A tensão S_1 muda para compressão na parte interna do sistema de revestimento cerâmico e varia de -0,0036MPa a -0,2637MPa, como mostrado na Tabela 6.23.

Tabela 6.23 - Caso 4: Tensões S_1 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	Nó40	Nó278	Nó516	Nó754	Nó992	Nó1230	Nó1468	Nó1706	Nó1944
07:00	0,0410	0,0470	0,0513	0,0540	0,0554	0,0278	0,0424	0,0717	0,0777
16:00	-0,1398	-0,1420	-0,1540	-0,1814	-0,2344	-0,2638	0,0357	0,1256	0,0370
18:00	-0,0393	-0,0399	-0,0431	-0,0505	-0,0646	-0,0716	0,0175	0,0422	0,0091

As tensões S_1 atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -0,1398MPa, -0,1540MPa e -0,2344MPa.

A Figura 6.54 apresenta o comportamento das tensões atuantes no sistema de revestimento quando ocorre a incidência da radiação solar (I_g), onde se verifica a tensão de tração no valor de 0,1256MPa e tensão de compressão -0,2638MPa, isso para às 16h onde a incidência solar alcança seu valor máximo.

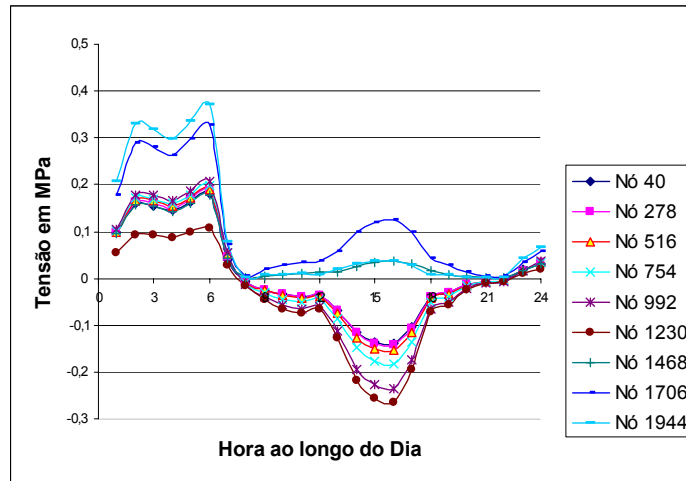


Figura 6.53 – Caso 4: Tensões S_1

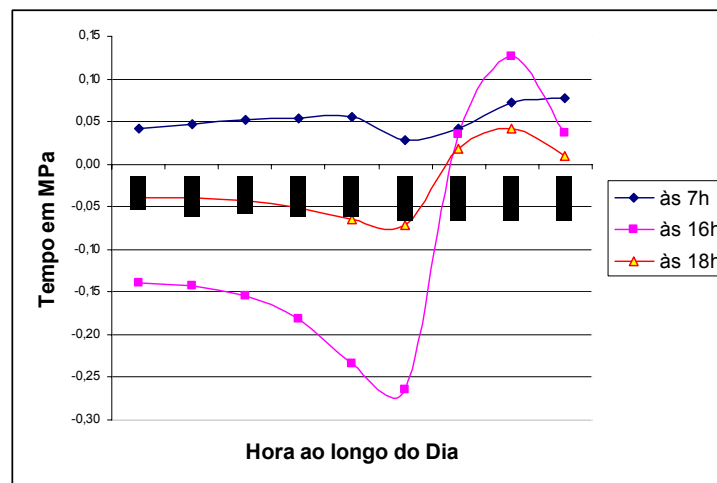


Figura 6.54 – Caso 4: Tensões S_1 às 7h, 16h e 18h

6.3.4.5 - Análise da Tensão S_2

A Figura 6.55 mostra as variações da tensão S_2 atuando sobre o sistema de revestimento cerâmico e seu comportamento é semelhante ao caso 2. O maior valor ocorre na superfície do revestimento (nó 1944) e é de -2,1136MPa, e o menor valor da tensão de compressão ocorre no nó 40 que é de -0,0254MPa, mostrado na Tabela 6.24.

Tabela 6.24 - Caso 4: Tensões S_2 nos nós do modelo para as 7h, 16h e 18h

Hora	N640	N6278	N6516	N6754	N6992	N61230	N61468	N61706	N61944
07:00	0,0254	0,0315	0,0361	0,0395	0,0435	0,0232	0,0300	0,0364	0,0373
16:00	-1,5101	-1,5758	-1,6592	-1,7782	-2,0290	-1,1541	-1,5270	-1,9708	-2,1136
18:00	-0,4143	-0,4691	-0,5157	-0,5586	-0,6249	-0,3433	-0,4485	-0,5612	-0,5884

As tensões S_2 atuantes na argamassa de emboço as 16h correspondente aos nós 40, 516 e 992 são, respectivamente, -1,5101MPa, -1,6592MPa e -2,0290MPa.

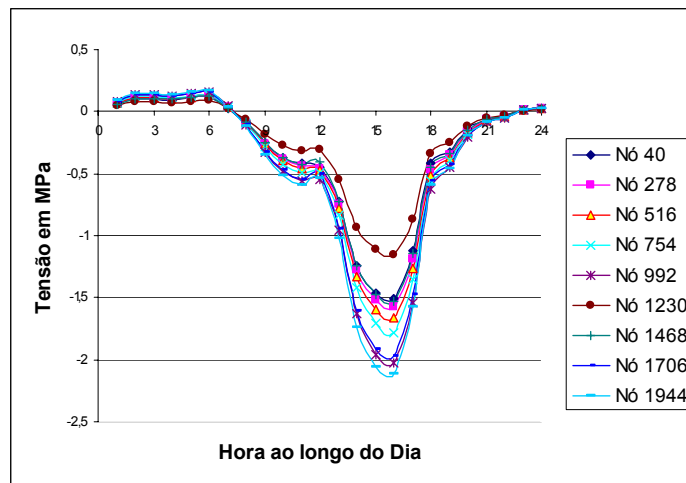


Figura 6.55 – Caso 4: Tensões S_2

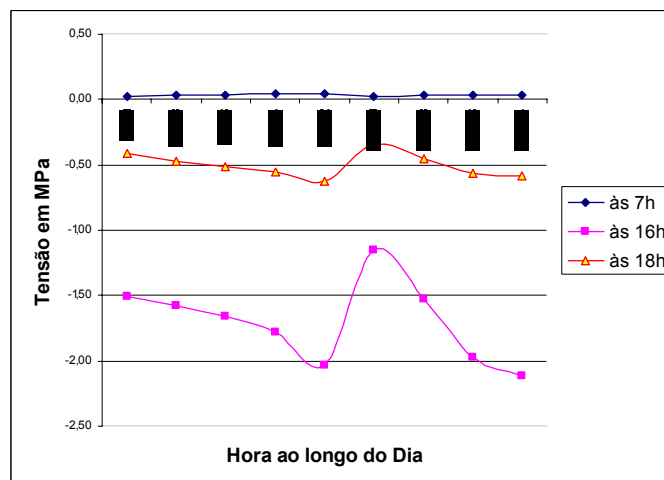


Figura 6.56 – Caso 4: Tensões S_2 às 7h, 16h e 18h

A Figura 6.56 mostra o comportamento das tensões atuantes no sistema de revestimento cerâmico quando ocorre a incidência da radiação solar. O valor da tensão máxima de compressão ocorre às 16h e é de -2,1136MPa, e a mínima ocorre a noite, onde há o resfriamento do sistema de revestimento, e é de -0,0387MPa no nó 40 as 22h.

6.3.4.6 – Deformada e Concentração de Tensão

A Figura 6.57 representa a deformada e a Figura 6.58 representa a tensão equivalente de Von-Mises na região de interesse mostrada na Figura 6.2a. Nota-se uma grande compressão na região do rejunte e, por consequência, um nível mais elevado de concentração de tensão também na vizinhança do rejunte.

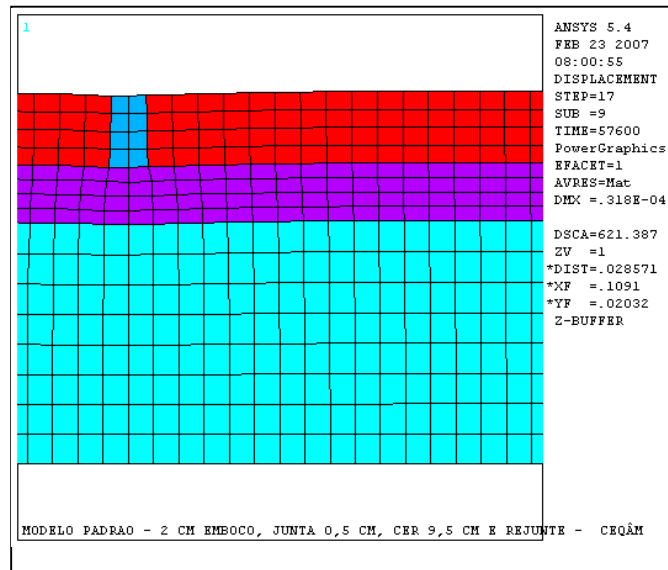


Figura 6.57 – Caso 4: Deformações - cerâmica escura - 16h

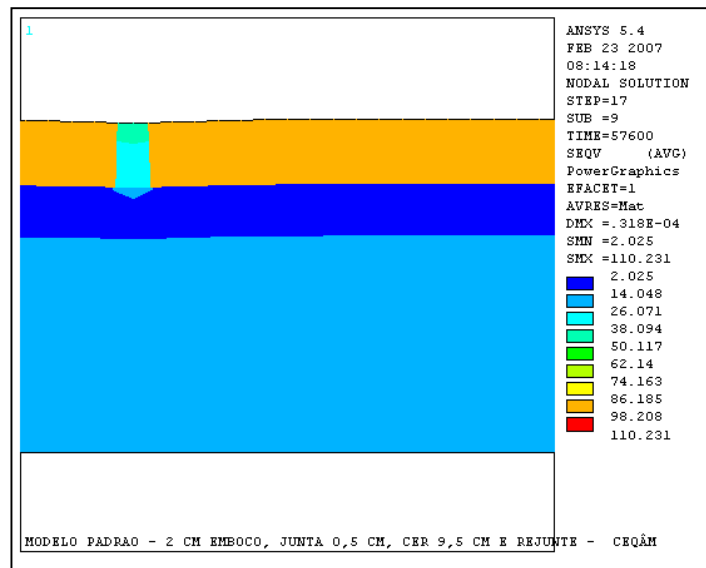


Figura 6.58 – Caso 4: Tensão (kgf/cm^2) de Von-Mises - cerâmica escura - 16h

6.3.4.7 - Análise da Fadiga

Para a análise da fadiga do material argamassa de emboço, o enfoque descrito no Capítulo 3 (seção 3.4.4) e Capítulo 4 (seção 4.4) é aqui adotado. A curva de fadiga a ser usada é a curva experimental da Figura 4.19 com a Equação 4.8. As maiores e menores tensões principais S_1 e S_2 na argamassa de emboço estão na Tabela 6.25.

Tabela 6.25: Caso-4: Tensões (MPa) para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço

Pelas tensões normais	
$S_{1\min} = -0,2344$	$\Delta S = S_{1\max} - S_{1\min} = 0.3 \text{ MPa} \rightarrow$ Figura-4.18 $\rightarrow S < \sigma_{Rf}^c = 1,70 \text{ MPa}$. Não há risco de ruptura por fadiga, ou seja, $N \rightarrow \infty$
$S_{1\max} = +0,0540$	
$S_{2\min} = -2,0290$	$\Delta S = S_{2\max} - S_{2\min} = 2.1 \text{ MPa} \rightarrow$ Figura-4.18 $\rightarrow N \approx 10^{4,11}$ (Há risco de ruptura depois de 35 anos)
$S_{2\max} = +0,0435$	

A Tabela 6.25 mostra, para o caso 4, as tensões S_1 e S_2 com seus respectivos valores máximos e mínimos para o cálculo da fadiga na argamassa de emboço. Como a variação da tensão principal S_1 é menor que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), não existe risco de ruptura. Já para a variação da tensão principal S_2 , onde o resultado é maior que a tensão de referência de fadiga à compressão (σ_{Rf}^c), a camada de argamassa de emboço sofrerá ruptura por fadiga após 35 anos de carga.

7 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos através do ensaio experimental da fadiga na argamassa de emboço e da análise numérica de um modelo simplificado de um sistema de revestimento cerâmico sob a ação de um carregamento transiente de natureza térmica, algumas conclusões são feitas a seguir.

7.1- ANÁLISE EXPERIMENTAL

O ensaio de fadiga sobre a argamassa de emboço em vários corpos-de-prova, sob mesma tensão alternada, apresentou resultados menos dispersos quando foi adotado um restrito controle de caracterização da argamassa de emboço. O fenômeno da ruptura à fadiga é fortemente dependente das características intrínsecas do corpo-de-prova, tais como: acabamento superficial (superfície deve ser lisa), consistência da argamassa, ar incorporado, resistência à tração na flexão e resistência à compressão, módulo de deformação e a existência de defeitos internos, que podem levar não só à heterogeneidade da amostra como também a regiões de elevada concentração de tensões. Portanto, deve-se usar corpo-de-prova de boa qualidade preparado de acordo com norma. Com controle de qualidade no preparo dos corpos-de-prova, os ensaios mostraram-se pouco dispersos. Nota-se que no dia-a-dia da engenharia fica difícil observar um comportamento regular à fadiga de um material como a argamassa de emboço, pois nesta situação nem sempre a argamassa exibe boa qualidade. Para levar em conta estas dispersões da prática da engenharia, faz-se necessário um número mais elevado de ensaios e a utilização de técnicas estatísticas de medição das características da argamassa para se poder, estatisticamente, avaliar a vida à fadiga N_f ou resistência à fadiga σ_f da argamassa.

O valor obtido no ensaio de resistência à tração na flexão da argamassa de emboço foi de 1,64MPa, conforme apresentado na Tabela 4.3. Os ensaios de fadiga são caracterizados por apresentar dispersão nos dados em função da irregularidade da micro-estrutura. Devido a isso, todas as normas conhecidas propõem realizar ensaios com carregamentos iguais e repetidos em corpos-de-prova semelhantes. Em função disso, neste trabalho foram realizados onze ensaios, utilizando-se, a cada três ensaios consecutivos, a mesma tensão sobre os corpos-de-prova. Utilizamos esse recurso (repetição da mesma tensão em três

ensaios consecutivos) para verificar que os números de ciclos eram bem determinados ou razoavelmente aproximados para cada nível de tensão alternada estudada.

Nota-se inicialmente que os corpos-de-prova sofreram danos até uma tensão de 0,86MPa. Com a tensão igual a 0,65MPa, os corpos-de-prova não sofreram ruptura até o número de ciclos igual a $10^{5,3}$ quando a máquina foi desligada – já que o ensaio estava sendo bastante demorado e já se havia passado um número elevado (10^5) de ciclos. Nota-se que este limite de $10^{5,3}$ ciclos é arbitrário. Na literatura encontram-se recomendações diversas sobre o número de ciclos acima do qual se pode considerar que o corpo-de-prova está numa tensão abaixo do limite de resistência à fadiga. Tendo-se chegado a $10^{5,3}$ ciclos, que corresponde a 546 anos, pode-se assumir que a resistência à fadiga ou limite de fadiga σ_f da argamassa de emboço é de 0,65MPa. Note que isso corresponde a 40% do valor da resistência à tração (f_{tk}) obtido num ensaio à flexão da argamassa de emboço, que foi determinada como sendo de $f_{tk}=1,64$ MPa. Portanto, a resistência à fadiga a tração da argamassa de emboço pode, em princípio, ser definida como $\sigma_{Rf} = 0,64$ MPa .

Por ser um material frágil como o concreto, a curva de comportamento à ruptura da argamassa de emboço à compressão e à tração foi aqui admitida compatível a critérios de resistência do concreto. Tal critério foi aqui caracterizado pela diminuição das curvas de ruptura entre estados de tensão à compressão (maior resistência) e à tração (menor resistência). Lembra-se que este procedimento constitui um passo inicial e, portanto, necessita ser estudado de forma mais detalhada.

De forma inédita neste trabalho foi projetado e executado ensaios em corpos-de-prova de argamassa de emboço sob carga cíclica e, assim, verificar de forma inédita o comportamento à fadiga à tração da argamassa. O modelo de ruptura adotado foi adaptado da literatura encontrada para as curva típica de materiais frágeis, curva de Coulomb-Mohr, com a hipótese de comportamento da argamassa de emboço semelhante ao concreto. Com esta hipótese, inferiu-se qual seria a provável curva de ruptura da argamassa à fadiga sob compressão.

Nos ensaios, uma dificuldade encontrada foi a produção de corpo-de-prova de qualidade e a fixação do mesmo na máquina de ensaio. A excentricidade foi um problema encontrado e

resolvido com dispositivo de conexão adequada para uma perfeita centralização do corpo-de-prova da máquina de ensaio.

7.2 – ANÁLISE NUMÉRICA

Dentre as diversas hipóteses plausíveis de modelos simplificados para o estudo por elementos finitos das tensões no sistema de revestimento cerâmico, foi adotado, neste trabalho, um modelo numérico conservador. Tal modelo considera a aderência absoluta entre argamassa de emboço e o substrato onde foi aplicada a argamassa. Isto gera tensões muito elevadas, pois o substrato foi considerado indeformável (substrato perfeitamente rígido). Uma melhoria neste modelo numérico seria considerar uma variante das condições de contorno impostas (substrato menos rígido, mais deformável). Para tentar aproximar o modelo em elementos finitos aqui usado a uma situação mais realista, pode-se medir a rigidez do substrato e impor no modelo em elementos finitos.

Outro fator conservador aqui adotado foi à escolha de um transiente muito severo. Dos resultados reportados neste trabalho, nota-se, portanto, um certo conservadorismo em termos de tensão tendo em vista o transiente máximo que foi escolhido e as condições de contorno simplificadas que foram adotadas no modelo em elementos finitos. Nota-se que o transiente aqui adotado ocorreu apenas uma vez na cidade de Brasília e constitui, portanto uma exceção. Este transiente gerou temperatura na superfície externa da cerâmica escura da ordem de 71°C e da cerâmica clara da ordem de 47 °C. Para se chegar a valores mais realistas, pode-se selecionar transientes menos severos. O ideal seria adotar os transientes médios de cada dia, ou uma média de cada mês.

A cerâmica escura absorve mais a temperatura aplicada devido ao fato de ter o coeficiente de absorção térmica maior que o da cerâmica clara (um pouco mais que o dobro). Assim, podemos observar que no modelo com cerâmica escura, as temperaturas maiores geram deformações e tensões maiores, o que leva a ruptura mais cedo – para as condições de contorno de confinamento aqui adotadas. Enquanto isso, no modelo com cerâmica clara, o efeito da temperatura cíclica no sistema é mais demorado em função da absorção menor da temperatura, gerado devido ao coeficiente de absorção térmica menor (0,45) se comparado ao valor da cerâmica escura (0,95). Do ponto de vista de tensão e deformação é, portanto, mais aconselhável a utilização da cerâmica clara para revestimento externo.

O comportamento cíclico das tensões nas diversas camadas do sistema de revestimento cerâmico foi aqui apresentado. Estes resultados ocorrem em função não só do transiente usado, das condições de contorno impostas, mas também devido às diferenças das propriedades dos materiais entre as diversas camadas do sistema de revestimento (peças cerâmicas e rejunte) da camada de cerâmica até as camadas mais internas (emboço em argamassa e substrato). Além disso, tem um papel fundamental nos valores das tensões aqui reportadas, o valor referencial de temperatura (também conservadora) aqui arbitrado.

As tensões normais no eixo X (tensão normal na direção longitudinal da fachada) são, essencialmente, de compressão - devido à dilatação dos materiais do revestimento cerâmico que estão confinados. Estas tensões obtidas através do modelo numérico para os quatro casos analisados, mostraram que a melhor situação ocorreu no Caso 2. Ou seja, utilizando-se a cerâmica clara e temperatura interna de referência de 25 °C as tensões são as menores obtidas. Isso se explica devido ao baixo índice de absorção térmica da cerâmica clara acrescido do fato da utilização de uma temperatura interna de referência maior, o que resulta numa menor perda de calor por condução térmica entre as interfaces do modelo e uma menor dilatação (compressão) das fibras. Este caso, quando comparado com o caso 3, revela uma queda de 35% nos valores das tensões normais ao longo do eixo X.

Os valores de tensão obtidos para o Caso 3 (cerâmica escura e temperatura interna de referência de 18°C) foram os mais conservadores dentre os casos aqui estudados. Podemos constatar que houve um acréscimo em torno de 60% nos valores das tensões normais ao longo do eixo X em relação aos outros casos analisados. Esse cenário, representado pelo Caso 3, foi utilizado para representar um ambiente típico com refrigeração onde se tem os maiores danos nas fachadas com cerâmica escura.

Com relação às tensões normais no eixo Y (tensão normal na direção transversal do sistema de revestimento), observamos que em função da utilização de um rejunte com elevado módulo de elasticidade, houve um aumento nas tensões normais ao longo do eixo Y na interface entre argamassa colante e rejunte. Observando o caso 3, devido aos valores das tensões normais no eixo Y – que na interface rejunte/emboço passa a ter valor de tração - existe uma maior tendência de “arrancamento/expulsão” entre a argamassa colante

e camada de emboço, uma maior compressão no rejunte, e leva um deslocamento do filete de rejunte e conseqüência das peças cerâmicas. Conforme ilustra a Figura 7.1.

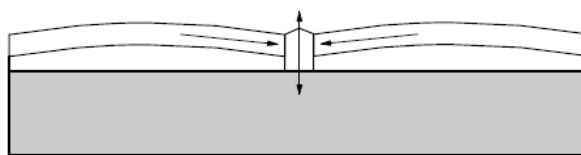


Figura 7.1 – Efeito da tração na região das camadas de rejunte (junta) no sistema de revestimento cerâmico

Portanto, as tensões normais ao longo do eixo Y mudam de compressão para tração após a interface da argamassa colante com rejunte (Nó 1468), no centro da camada de rejunte (Nó 1706) e na parte externa do rejunte (Nó 1944) – Figura 6.1. Isso se deve ao fato da deformabilidade do rejunte ser maior do que das peças cerâmicas. Com a compressão no sentido do eixo-x há um favorecimento para a expulsão do rejunte e conseqüente flambagem das peças cerâmicas do sistema. Colabora também com este fenômeno a única direção para a qual a cerâmica pode se movimentar, já que a camada de argamassa colante impede o deslocamento da cerâmica e do rejunte para baixo (entrando no emboço). Esse processo é ilustrado na Figura 7.1.

7.3 – TRABALHOS FUTUROS

Elaborar um modelo numérico que leve em consideração o comportamento não linear e as curvas de ruptura de cada material que compõem o sistema de revestimento cerâmico. Isso propiciará melhor conhecimento dos estados de tensão e deformação dos sistemas de revestimento cerâmicos. Considerar também na modelagem numérica com o método dos elementos finitos a variação das propriedades dos materiais com a temperatura do transiente. Estudar também outras condições de contorno – mais realistas – como forma de melhorar os resultados aqui tão conservadores.

Tentar achar um modelo teórico representativo das tensões térmicas atuantes no sistema de revestimento de tal forma que este modelo representativo possa ser usado com facilidade por projetistas.

Realizar um levantamento experimental da verdadeira influência da ciclagem do carregamento térmico no dia-a-dia tendo em vista o problema da fadiga. Isto permitirá observar se os modelos aqui adotados para a ruptura da argamassa são representativos.

Fazer mais experimentos com corpos-de-prova sob tração e principalmente sob compressão do material argamassa de emboço. Isto deve mostrar quão válida é a hipótese aqui adotada de semelhança entre o comportamento do material frágil concreto e o material frágil argamassa.

Para se entender de forma mais completa o fenômeno da fadiga em sistemas de revestimento, fazer também os mesmos ensaios à fadiga para os outros materiais que compõem o sistema,, isto é: para a argamassa colante, rejunte e cerâmica (cobrindo portanto, todos os materiais que compõem o sistema de revestimento).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1995). NORMA MERCOSUR, NM 47:95. (1995). Concreto - determinação do Teor de Ar em Concreto Fresco - Método Pressométrico.
- ABNT (2003). NBR 6118. Projeto de Estruturas de Concreto. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2003). NBR 8522. Determinação dos Módulos Estático de Elasticidade e de Deformação e da Curva Tensão-Deformação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2005). NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2005). NBR 13279. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2005). NBR 13281. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABC (1996). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (1996). Cerâmica Industrial, v 7, n° 2. São Paulo.
- ANSYS (1994). Analysis System - volumes 1 a 5. Houston, PA - USA.
- ARAÚJO JR., J. M. (2004). Contribuição ao Estudo das propriedades Físico-Mecânicas das Argamassas de Revestimento. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 175p.

- BABU, R. R., BENIPAL, G. S. e SINGH, A. K. (2005). Constitutive Modeling of Concrete: An overview. *Asian J. of Civil Eng. (Building and Housing)*, v 6, n° 4.
- BAÍA, L. L. M. e SABBATINI, F. H. (2004). Projeto e Execução de Revestimento de Argamassa CTE, Primeiros Passos da Qualidade no Canteiro de Obra, O Nome da Rosa, Terceira edição, São Paulo, SP.
- BOWMAN, R. G. e BANKS, P. J. (1995). Theoretical Modeling of External Wall Tiling Systems.
- 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.
- BROEK, D. (1998). *The Practical Use of Fracture Mechanics* Kluwer Academic Publishers, OH, USA.
- BSI (1975). British Standards Institution. BS 1377. Determination by Liquid Limit by Cone Penetrometer Method. 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.
- CERVO, T.C. (2004). Estudo da Resistência à Fadiga de Concreto de Cimento Portland para Pavimentação. Tese de Doutorado. EP-USP, Brasil.
- CHEW, M. Y. L. (1992). The Study of Adhesion Failure of Wall Tiles. *Building and Environment*, v 27, n° 4, pp 493-499.
- 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. C. (1974). Física Aplicada à Construção – Conforto Térmico. Editora Edgard Blücher, São Paulo, SP.
- 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.
- EUROPEAN UNION (2000) – Brite EuRam III. LWA Concrete Under Fatigue Loading. A literature survey and a number of conducted fatigue tests. EuroLightCon. Document BE96-3942/R41, June.
- FELBECK, D. K. (1971). Introdução aos Mecanismos de Resistência Mecânica. Editora Edgard Blücher, São Paulo, SP.
- 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 SANTOS, C. A. (2000). Ensaaios dos Materiais. JC Editora, Rio de Janeiro, RJ.
- GONÇALVES, S. R. C. (2004). Variabilidade e Fatores de Dispersão da Resistência de Aderência nos Revestimentos em Argamassa – Estudo de Caso. Dissertação de Mestrado da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 148p.
- INMET (2006). INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. www.inmet.gov.br. Site consultado no mês de maio.

- IPT (1981). Relatório 16.277. Volume IV. Avaliação de Desempenho de Habitações Térreas Unifamiliares - Conforto Higrotérmico. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, SP.
- ISO 13006: Normas Mundiais de Pisos e Azulejos, Revestimentos Cerâmicos: Especificações e Usos. CCB – Informação ao público.
- JASTRZEBSKI, Z. D. (1977). The Nature and Properties of Engineering Materials. Editora John Willey & Sons, New York, USA.
- JUNGINGER, MAX (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., HILSDORF, H. K. e RUSCH, H. (1969). Behaviour of Concrete Under Biaxial Stresses, Proc. Amer. Concrete Inst. 66(8) pp 656-666.
- LOBATO PAES, I. N. (2000). Influência da Junta de Assentamento no Comportamento Térmico do Sistema de Revestimento Cerâmico. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Goiás, Escola de Eng. Civil, Goiás, GO.
- LOBATO PAES, I. N. e CARASEK, H. (2001). Desempenho das Argamassas de Rejuntamento no Sistema de Revestimento Cerâmico. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construtivo, Porto Alegre, RS.
- 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.
- PASTOUKHOV, V. A. e VOORWALD, H. J. C. (1995). Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural. Editora Unesp, São Paulo, SP.
- RILEM FINAL RECOMMENDATIONS. (1982). 13 - MR Technical Committee on Mortars and Renderings. Matériaux et Constructions, v 15, n° 89, pp 475-519. França.

- RIVERO, R. (1985). Acondicionamento Térmico Natural - Arquitetura e Clima, Editora da Universidade, Rio Grande do Sul.
- 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. (1999). Efeito de Temperatura nas Tensões em Sistema de Revestimento Cerâmico de Fachadas. Volume II dos Anais do III Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, Vitória, ES.
- 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.
- SHANLEY, F. R. (1957). Strength of Materials. MacGraw-Hill Inc. New York, USA.
- SELMO, S. M. S. (1996). Revestimentos de Argamassas de Paredes e Tetos de Edifícios - Projeto, Execução e Manutenção Curso Intensivo de Argamassa de Assentamento e Revestimento. Associação Brasileira de Cimento Portland.
- SHIGLEY, J. e MISCHE, C. (2004). Mechanical Engineering Design, New York: McGraw Hill.
- 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.
- 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.

- 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.
- THOMAZ, E. (1989). Trincas em Edifícios - Causas, Prevenção e Recuperação. Co-edição IPT/EPUSP/PINI. São Paulo, SP.
- TIMOSHENKO, S. P. (1969). Resistência dos Materiais. Editora Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, RJ.
- TIMOSHENKO, P. S. (1961). Theory of Elastic Stability. MacGraw-Hill Book Company Inc. New York, USA.
- YOSHIKAWA, K. e LITVAN, G. G. (1994). Thermal Stress in Mortar-Tile Systems. RILEM- Materiaux et Constructions, v 17, n° 101, pp 351-357.
- VAN VLACK, L. H. (1984). Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais. Traduzido por Monteiro, E. 4° Edição Rio de Janeiro, Campos.
- VIEIRA, A. C. (1998). Destacamento de Placas Cerâmicas: Estudo de Algumas Variáveis, Dissertação de Mestrado, Universidade Mackenzie, São Paulo, SP.
- WILLAM, K. J. e WARNKE, 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

A partir da definição de troca de calor em fachadas, descrito no Capítulo 3, e do transiente utilizado, fornecido pelo INMET (2006), conforme descrito no Capítulo 5, neste Apêndice são calculadas as temperaturas transientes para impor no modelo em elementos finitos.

Considera-se, inicialmente, a Equação 3.15 $\varepsilon\Delta I_L/he = 0$, porque o estudo se refere a uma fachada em plano vertical. Para a análise do gradiente de temperatura foram considerados os dados de temperatura da cidade de Brasília, localizada na latitude $\theta = 15^{\circ}47' S$. Foi utilizada a maior temperatura já registrada na cidade de Brasília, que ocorreu no ano de 1963, segundo fonte do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), cujo transiente ao longo do dia está na Tabela 5.7.

Para o cálculo da temperatura equivalente (Equação 3.15) foram utilizados os dados de radiação solar incidente (I_g) 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, conforme descrito em Frota e Schiffer (2003) e apresentado na Tabela A.1.

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

Hora	I_g (W/m ²)	Hora	I_g (W/m ²)
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 3.15, foram sugeridos por Latta (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

Ainda relativo à Equação 3.15, o valor da condutância superficial exterior da parede (he), a ser adotado neste trabalho, é de $18W/m^2 \cdot ^\circ C$ e foi calculado através da média aritmética dos valores he referentes aos cinco tipos de ventos, conforme descrito em Frota e Schiffer (2003) e Rivero (1985) apresentado na Tabela A.3.

Tabela A.3 – Variação da condutância térmica superficial externa (he)

Tipo de Vento	Velocidade do Vento (m/s)	he (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

Usando mais uma vez a Equação 3.15, da temperatura equivalente (tq), apresentamos nas Equações A.1 e A.2, o cálculo da temperatura superficial externa (te) do revestimento para a cerâmica clara e cerâmica escura, respectivamente.

$$te_{Clara} = Te + \frac{0,45.Ig}{25} \quad (A.1)$$

$$te_{Escura} = Te + \frac{0,95.Ig}{25} \quad (A.2)$$

As Equações A.3 e A.4 apresentam o valor da temperatura superficial externa (te) para as cerâmicas clara e escura, considerando a maior temperatura do dia (Te) de $34,60^\circ C$, referente ao horário das 16 horas. Para as demais temperaturas do dia, o valor da

temperatura superficial externa (te), para a cerâmica clara e escura, está apresentado na Tabela A.4.

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

$$te_{Escura} = 34,60 + \frac{0,95.692}{25} = 60,90^{\circ}C \quad (A.4)$$

Tabela A.4 – Valores da temperatura superficial externa do sistema de revestimento para cerâmica clara e escura

Hora	Te (°C)	Ig (W/m ²)	TqClara (°C)	TqEscura (°C)
0:00	24,49	0	24,49	24,49
1:00	23,46	0	23,46	23,46
2:00	22,48	0	22,48	22,48
3:00	22,55	0	22,55	22,55
4:00	22,71	0	22,71	22,71
5:00	22,41	0	22,41	22,41
6:00	22,14	0	22,14	22,14
7:00	23,20	30	23,74	24,34
8:00	25,32	45	26,13	27,03
9:00	28,96	53	29,91	30,97
10:00	31,38	60	32,46	33,66
11:00	32,51	65	33,68	34,98
12:00	32,84	68	33,73	35,09
13:00	33,67	224	37,70	42,18
14:00	33,98	536	43,63	54,35
15:00	34,21	680	46,22	59,82
16:00	34,60	692	47,06	60,90
17:00	34,42	457	42,65	51,79
18:00	34,34	23	34,75	35,21
19:00	32,79	0	32,79	32,79
20:00	28,46	0	28,46	28,46
21:00	26,48	0	26,48	26,48
22:00	25,94	0	25,94	25,94
23:00	24,71	0	24,71	24,71

Para o cálculo das temperaturas internas (Equações 3.16 à 3.20), os valores do coeficiente de condutibilidade térmica (K) foram extraídos do relatório do IPT n° 16277 (1989), de acordo com as massas específicas de cada material que compõe o sistema de revestimento cerâmico, como mostrado na Tabela A.5.

Tabela A.5 – 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 5.2. Com aquela geometria pode-se calcular o valor da resistência térmica (Rt) como sendo:

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

$$Rt = 0,00378 + 0,00265 + 0,01661 + 0,12 + 0,01661 = 0,15965^{\circ}\text{C} / \text{Kcal} / \text{h}$$

Considerando a temperatura interna da edificação (T_i) de 18°C e as temperaturas externas (t_e) calculadas, anteriormente, para a cerâmica clara e escura, serão calculadas, agora, as temperaturas das interfaces t_2 , t_3 , t_4 , t_5 e t_i do modelo de sistema de revestimento cerâmico, como mostrado na Figura A.1.

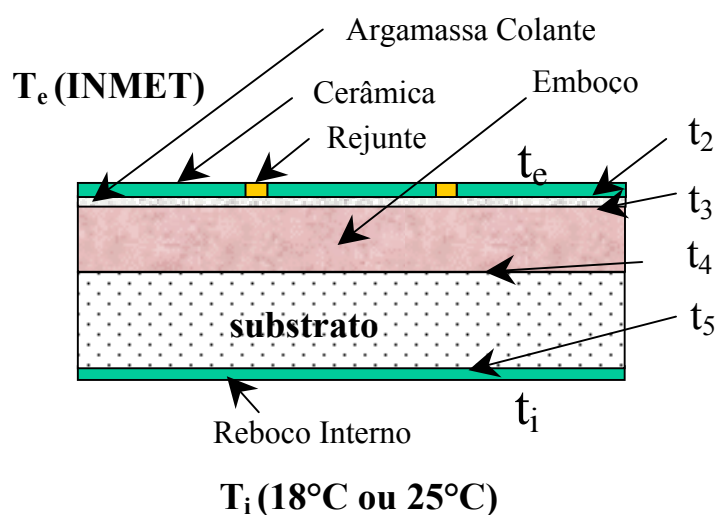


Figura A.1 – Demonstração da leitura de temperatura nas interfaces do revestimento

A seguir, será apresentado o processo de cálculo das temperaturas nas interfaces para a cerâmica clara e escura, considerando a maior temperatura do dia (T_e) de 36,40°C, referente ao horário das 16 horas. Para as demais temperaturas do dia, o valor das

temperaturas nas interfaces está apresentado nas Tabelas A.6 e A.7, para cerâmica clara e escura, respectivamente.

Cálculo das temperaturas nas interfaces da cerâmica clara:

A partir da Equação 3.16, aqui repetida por comodidade, temos:

$$Q = \frac{\Delta t}{Rt} \quad (\text{A.5})$$

sendo:

$$\Delta t = te_{\text{clara}} - Ti = 47,06 - 25,00 = 22,06^{\circ}\text{C}$$

substituindo os valores na Equação A.5, temos:

$$Q = \frac{22,06}{0,15965} = 138,177 \text{Kcal/h}$$

para o cálculo das temperaturas nas interfaces t_2 , t_3 , t_4 , t_5 e t_i , utilizaremos a equação abaixo, derivada da Equação A.5.

$$\Delta t = Q.Rt \quad (\text{A.6})$$

Cálculo da temperatura na interface argamassa colante/cerâmica (t_2):

$$te_{\text{clara}} - t_2 = Q.Rt_{e,2} \quad (\text{A.7})$$

$$47,06 - t_2 = 138,177.0,00378$$

$$t_2 = 46,54^{\circ}\text{C}$$

Cálculo da temperatura na interface argamassa colante/emboço (t_3):

$$t_2 - t_3 = Q.Rt_{2,3} \quad (\text{A.8})$$

$$46,54 - t_3 = 138,177.0,00265$$

$$t_3 = 46,17^\circ C$$

Cálculo da temperatura na interface emboço/substrato (t_4):

$$t_3 - t_4 = Q.Rt_{3,4} \quad (A.9)$$

$$46,17 - t_4 = 138,177.0,01661$$

$$t_4 = 43,88^\circ C$$

Cálculo da temperatura na interface substrato/reboco interno (t_5):

$$t_4 - t_5 = Q.Rt_{4,5} \quad (A.10)$$

$$43,88 - t_5 = 138,177.0,12$$

$$t_5 = 27,30^\circ C$$

Cálculo da temperatura interna da edificação (t_i):

$$t_5 - t_i = Q.Rt_{5,i} \quad (A.11)$$

$$27,30 - t_i = 138,177.0,01661$$

$$t_i = 25,00^\circ C$$

Tabela A.6 – Transiente-2: Valor das temperaturas nas interfaces para cerâmica clara

CERÂMICA CLARA						
Hora	t_e	t_2	t_3	t_4	t_5	t_i
0	24,49	24,50	24,51	24,56	24,95	25,00
1	23,46	23,50	23,52	23,68	24,84	25,00
2	22,48	22,54	22,58	22,84	24,74	25,00
3	22,55	22,61	22,65	22,90	24,75	25,00
4	22,71	22,76	22,80	23,04	24,76	25,00
5	22,41	22,47	22,51	22,78	24,73	25,00
6	22,14	22,21	22,26	22,55	24,70	25,00
7	23,74	23,77	23,79	23,92	24,87	25,00
8	26,13	26,10	26,08	25,97	25,12	25,00
9	29,91	29,79	29,71	29,20	25,51	25,00
10	32,46	32,28	32,16	31,38	25,78	25,00
11	33,68	33,47	33,33	32,43	25,90	25,00
12	34,06	33,85	33,70	32,75	25,97	25,00
13	37,70	37,40	37,19	35,87	26,32	25,00
14	43,63	43,19	42,88	40,94	26,94	25,00
15	46,22	45,72	45,37	43,16	27,21	25,00
16	47,06	46,54	46,17	43,88	27,30	25,00
17	42,65	42,23	41,94	40,10	26,84	25,00

18	34,75	34,52	34,36	33,34	26,01	25,00
19	32,79	32,61	32,48	31,67	25,81	25,00
20	28,46	28,38	28,32	27,96	25,36	25,00
21	26,48	26,44	26,42	26,27	25,15	25,00
22	25,94	25,92	25,90	25,80	25,10	25,00
23	24,71	24,72	24,72	24,75	24,97	25,00

Cálculo das temperaturas nas interfaces da cerâmica escura, usando a Equação A.5:

$$\Delta t = te_{Escura} - Ti = 60,90 - 25,00 = 35,90^{\circ}C$$

Substituindo os valores na Equação A.5, temos:

$$Q = \frac{35,90}{0,15965} = 224,8661 Kcal/h$$

Para o cálculo das temperaturas nas interfaces t_2 , t_3 , t_4 , t_5 e t_i , utiliza-se a Equação A.5.

Cálculo da temperatura na interface argamassa colante/cerâmica (t_2):

$$te_{Escura} - t_2 = Q \cdot R_{e,2} \quad (A.12)$$

$$60,90 - t_2 = 224,866 \cdot 0,00378$$

$$t_2 = 60,05^{\circ}C$$

Cálculo da temperatura na interface argamassa colante/emboço (t_3):

$$t_2 - t_3 = Q \cdot R_{2,3} \quad (A.13)$$

$$60,05 - t_3 = 224,866 \cdot 0,00265$$

$$t_3 = 59,45^{\circ}C$$

Cálculo da temperatura na interface emboço/substrato (t_4):

$$t_3 - t_4 = Q \cdot R_{3,4} \quad (A.14)$$

$$59,45 - t_4 = 224,866 \cdot 0,01661$$

$$t_4 = 55,72^\circ C$$

Cálculo da temperatura na interface substrato/reboco interno (t_5):

$$t_4 - t_5 = Q \cdot R_{t_{4,5}} \quad (A.15)$$

$$55,72 - t_5 = 224,866 \cdot 0,12$$

$$t_5 = 28,74^\circ C$$

Cálculo da temperatura interna da edificação (t_i):

$$t_5 - t_i = Q \cdot R_{t_{5,i}} \quad (A.16)$$

$$28,74 - t_i = 224,866 \cdot 0,01661$$

$$t_i = 25,00^\circ C$$

Tabela A.7 – Transiente-4: Valor das temperaturas nas interfaces para cerâmica escura

CERÂMICA ESCURA						
Hora	t_e	t_2	t_3	t_4	t_5	t_i
0	24,49	24,50	24,51	24,56	24,95	25,00
1	23,46	23,50	23,52	23,68	24,84	25,00
2	22,48	22,54	22,58	22,84	24,74	25,00
3	22,55	22,61	22,65	22,90	24,75	25,00
4	22,71	22,76	22,80	23,04	24,76	25,00
5	22,41	22,47	22,51	22,78	24,73	25,00
6	22,14	22,21	22,26	22,55	24,70	25,00
7	24,34	24,36	24,37	24,44	24,93	25,00
8	27,03	26,98	26,95	26,74	25,21	25,00
9	30,97	30,83	30,73	30,11	25,62	25,00
10	33,66	33,45	33,31	32,41	25,90	25,00
11	34,98	34,74	34,58	33,54	26,04	25,00
12	35,42	35,17	35,00	33,92	26,08	25,00
13	42,18	41,77	41,49	39,70	26,79	25,00
14	54,35	53,66	53,17	50,11	28,05	25,00
15	59,82	59,00	58,42	54,79	28,62	25,00
16	60,90	60,05	59,45	55,72	28,74	25,00
17	51,79	51,16	50,71	47,92	27,79	25,00
18	35,21	34,97	34,80	33,74	26,06	25,00
19	32,79	32,61	32,48	31,67	25,81	25,00
20	28,46	28,38	28,32	27,96	25,36	25,00
21	26,48	26,44	26,42	26,27	25,15	25,00
22	25,94	25,92	25,90	25,80	25,10	25,00
23	24,71	24,72	24,72	24,75	24,97	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.8 e A.9, respectivamente. Os valores foram obtidos usando-se o mesmo procedimento, descrito acima, para a temperatura interna de 25°C.

Tabela A.8 – Transiente-1: Valor das temperaturas nas interfaces para cerâmica clara

CERÂMICA CLARA						
Hora	t_e	t₂	t₃	t₄	t₅	t_i
0	24,49	24,34	24,07	23,41	18,66	18,00
1	23,46	23,33	23,10	22,50	18,55	18,00
2	22,48	22,38	22,19	21,73	18,45	18,00
3	22,55	22,45	22,25	21,79	18,46	18,00
4	22,71	22,60	22,40	21,93	18,48	18,00
5	22,41	22,31	22,12	21,68	18,45	18,00
6	22,14	22,04	21,87	21,45	18,42	18,00
7	23,95	23,81	23,56	22,96	18,60	18,00
8	26,45	26,26	25,90	25,04	18,86	18,00
9	30,29	30,01	29,49	28,24	19,25	18,00
10	32,88	32,54	31,91	30,40	19,51	18,00
11	34,14	33,77	33,09	31,45	19,64	18,00
12	34,54	34,16	33,46	31,78	19,68	18,00
13	39,27	38,78	37,88	35,73	20,16	18,00
14	47,38	46,70	45,46	42,48	20,98	18,00
15	51,21	50,44	49,04	45,68	21,36	18,00
16	51,90	51,12	49,69	46,25	21,43	18,00
17	45,85	45,21	44,03	41,21	20,82	18,00
18	34,92	34,53	33,81	32,10	19,71	18,00
19	32,79	32,45	31,82	30,33	19,50	18,00
20	28,46	28,22	27,78	26,72	19,06	18,00
21	26,48	26,28	25,93	25,07	18,86	18,00
22	25,94	25,76	25,42	24,62	18,80	18,00
23	24,71	24,56	24,27	23,59	18,68	18,00

Tabela A.9 – Transiente-3: Valor das temperaturas nas interfaces para cerâmica escura

CERÂMICA ESCURA						
Hora	t_e	t₂	t₃	t₄	t₅	t_i
0	24,49	24,34	24,07	23,41	18,66	18,00
1	23,46	23,33	23,10	22,50	18,55	18,00
2	22,48	22,38	22,19	21,73	18,45	18,00
3	22,55	22,45	22,25	21,79	18,46	18,00
4	22,71	22,60	22,40	21,93	18,48	18,00
5	22,41	22,31	22,12	21,68	18,45	18,00
6	22,14	22,04	21,87	21,45	18,42	18,00
7	24,78	24,62	24,34	23,65	18,69	18,00
8	27,70	27,48	27,07	26,08	18,98	18,00
9	31,76	31,44	30,86	29,47	19,39	18,00
10	34,55	34,17	33,47	31,79	19,68	18,00

11	35,94	35,53	34,77	32,95	19,82	18,00
12	36,43	36,01	35,23	33,36	19,87	18,00
13	45,49	44,86	43,69	40,91	20,79	18,00
14	62,27	61,25	59,38	54,89	22,49	18,00
15	70,10	68,90	66,70	61,42	23,28	18,00
16	71,12	69,90	67,65	62,27	23,38	18,00
17	58,54	57,61	55,89	51,78	22,11	18,00
18	35,55	35,15	34,40	32,63	19,78	18,00
19	32,79	32,45	31,82	30,33	19,50	18,00
20	28,46	28,22	27,78	26,72	19,06	18,00
21	26,48	26,28	25,93	25,07	18,86	18,00
22	25,94	25,76	25,42	24,62	18,80	18,00
23	24,71	24,56	24,27	23,59	18,68	18,00

APÊNDICE B

RESULTADOS DAS TEMPERATURAS

Os valores das temperaturas nas camadas da seção estudada (Seção A-A' da Figura 6.1) do sistema de revestimento cerâmico, no método de elementos finitos, usando-se as temperaturas internas de 18°C e 25°C para a cerâmica clara e escura, ao longo do dia, são apresentados nas Tabelas B.1, B.2, B.3 e B.4.

Tabela B.1 – Caso 1: Valor das temperaturas nas camadas da seção A-A' para cerâmica clara e temperatura interna de 18°C

CERÂMICA CLARA									
Hora	Nó 40	Nó278	Nó 516	Nó 754	Nó 992	Nó 1230	Nó 1468	Nó 1706	Nó 1944
0	22,50	22,52	22,59	22,70	22,86	23,02	23,18	23,32	23,46
1	21,73	21,87	22,00	22,12	22,23	22,31	22,39	22,44	22,48
2	21,79	21,90	22,02	22,13	22,24	22,34	22,43	22,49	22,55
3	21,93	22,04	22,16	22,27	22,39	22,49	22,58	22,65	22,71
4	21,68	21,80	21,91	22,03	22,13	22,22	22,30	22,36	22,41
5	21,45	21,56	21,67	21,78	21,88	21,96	22,04	22,09	22,14
6	22,96	23,06	23,18	23,32	23,47	23,61	23,74	23,85	23,95
7	25,04	25,19	25,36	25,55	25,77	25,97	26,16	26,31	26,45
8	28,24	28,45	28,69	28,97	29,29	29,58	29,86	30,08	30,29
9	30,40	30,71	31,04	31,39	31,77	32,10	32,42	32,65	32,88
10	31,45	31,82	32,21	32,60	33,01	33,35	33,68	33,92	34,14
11	31,78	32,19	32,60	33,01	33,42	33,76	34,09	34,32	34,54
12	35,73	36,14	36,59	37,09	37,64	38,11	38,58	38,93	39,27
13	42,48	43,00	43,61	44,29	45,05	45,72	46,38	46,89	47,38
14	45,68	46,41	47,18	47,99	48,83	49,54	50,23	50,73	51,21
15	46,25	47,08	47,93	48,77	49,62	50,32	50,98	51,46	51,90
16	41,21	42,07	42,88	43,62	44,29	44,80	45,27	45,59	45,85
17	32,10	32,82	33,43	33,93	34,31	34,56	34,76	34,87	34,92
18	30,33	30,76	31,17	31,55	31,91	32,19	32,46	32,64	32,79
19	26,72	27,10	27,43	27,73	27,97	28,15	28,30	28,39	28,46
20	25,07	25,34	25,58	25,81	26,01	26,17	26,31	26,40	26,48
21	24,62	24,83	25,04	25,24	25,44	25,60	25,74	25,85	25,94
22	23,59	23,79	23,98	24,16	24,32	24,45	24,56	24,64	24,71
23	23,41	23,58	23,75	23,91	24,07	24,20	24,32	24,41	24,49

Tabela B.2 – Caso 2: Valor das temperaturas nas camadas da seção A-A' para cerâmica clara e temperatura interna de 25°C

CERÂMICA CLARA									
Hora	Nó 40	Nó278	Nó 516	Nó 754	Nó 992	Nó 1230	Nó 1468	Nó 1706	Nó 1944
0	23,68	23,69	23,68	23,66	23,62	23,58	23,54	23,50	23,46
1	22,84	22,81	22,77	22,73	22,67	22,62	22,56	22,52	22,48
2	22,90	22,85	22,79	22,74	22,69	22,64	22,60	22,58	22,55
3	22,04	22,16	22,26	22,36	22,46	22,54	22,61	22,66	22,71
4	22,78	22,71	22,65	22,60	22,55	22,51	22,47	22,44	22,41
5	22,55	22,50	22,44	22,38	22,32	22,26	22,21	22,18	22,14
6	23,92	23,85	23,79	23,76	23,74	23,73	23,73	23,73	23,74
7	25,97	25,93	25,91	25,92	25,95	25,99	26,04	26,08	26,13
8	29,20	29,20	29,25	29,33	29,45	29,57	29,70	29,80	29,91
9	31,38	31,47	31,59	31,74	31,91	32,06	32,22	32,34	32,46
10	32,43	32,59	32,75	32,93	33,12	33,29	33,45	33,57	33,68
11	32,75	32,94	33,13	33,32	33,52	33,68	33,84	33,95	34,06
12	35,87	36,05	36,26	36,51	36,80	37,05	37,31	37,51	37,70
13	40,94	41,19	41,49	41,85	42,28	42,66	43,04	43,34	43,63
14	43,16	43,55	43,97	44,41	44,88	45,28	45,66	45,95	46,22
15	43,88	44,20	44,52	44,85	45,18	45,46	45,72	45,90	46,07
16	40,10	40,59	41,05	41,46	41,82	42,10	42,35	42,51	42,65
17	33,34	33,77	34,12	34,38	34,57	34,67	34,74	34,76	34,75
18	31,67	31,89	32,09	32,27	32,43	32,55	32,66	32,74	32,79
19	27,96	28,15	28,30	28,41	28,47	28,49	28,50	28,49	28,46
20	26,27	26,36	26,42	26,47	26,49	26,50	26,50	26,49	26,48
21	25,80	25,84	25,87	25,89	25,91	25,92	25,93	25,94	25,94
22	24,75	24,78	24,79	24,79	24,78	24,77	24,75	24,73	24,71
23	24,56	24,56	24,55	24,54	24,53	24,52	24,51	24,50	24,49

Tabela B.3 – Caso 3: Valor das temperaturas nas camadas da seção A-A' para cerâmica escura e temperatura interna de 18°C

CERÂMICA ESCURA									
Hora	Nó 40	Nó278	Nó 516	Nó 754	Nó 992	Nó 1230	Nó 1468	Nó 1706	Nó 1944
0	22,50	22,52	22,59	22,70	22,86	23,02	23,18	23,32	23,46
1	21,73	21,87	22,00	22,12	22,23	22,31	22,39	22,44	22,48
2	21,79	21,90	22,02	22,13	22,24	22,34	22,43	22,49	22,55
3	21,93	22,04	22,16	22,27	22,39	22,49	22,58	22,65	22,71
4	21,68	21,80	21,91	22,03	22,13	22,22	22,30	22,36	22,41
5	21,45	21,56	21,67	21,78	21,88	21,96	22,04	22,09	22,14
6	23,65	23,75	23,88	24,03	24,21	24,37	24,53	24,65	24,78
7	26,08	26,25	26,44	26,67	26,92	27,14	27,36	27,53	27,70
8	29,47	29,71	29,98	30,30	30,66	30,97	31,29	31,53	31,76
9	31,79	32,13	32,50	32,90	33,32	33,68	34,04	34,30	34,55
10	32,95	33,36	33,79	34,23	34,68	35,06	35,43	35,69	35,94
11	33,36	33,81	34,27	34,73	35,19	35,56	35,93	36,19	36,43
12	40,91	41,36	41,89	42,52	43,24	43,88	44,52	45,01	45,49
13	54,89	55,56	56,39	57,38	58,54	59,59	60,65	61,46	62,27
14	61,42	62,52	63,70	64,96	66,28	67,41	68,51	69,32	70,10
15	62,27	63,58	64,90	66,22	67,55	68,64	69,68	70,43	71,12
16	51,78	53,14	54,38	55,48	56,45	57,16	57,80	58,21	58,54
17	32,63	33,69	34,52	35,11	35,47	35,63	35,70	35,67	35,55
18	30,33	30,78	31,20	31,58	31,94	32,22	32,47	32,64	32,79
19	26,72	27,10	27,43	27,73	27,97	28,15	28,30	28,39	28,46
20	25,07	25,34	25,58	25,81	26,01	26,17	26,31	26,40	26,48
21	24,62	24,83	25,04	25,24	25,44	25,60	25,74	25,85	25,94
22	23,59	23,79	23,98	24,16	24,32	24,45	24,56	24,64	24,71
23	23,41	23,58	23,75	23,91	24,07	24,20	24,32	24,41	24,49

Tabela B.4 – Caso 4: Valor das temperaturas nas camadas da seção A-A' para cerâmica escura e temperatura interna de 25°C

CERÂMICA ESCURA									
Hora	Nó 40	Nó278	Nó 516	Nó 754	Nó 992	Nó 1230	Nó 1468	Nó 1706	Nó 1944
0	23,68	23,69	23,68	23,66	23,62	23,58	23,54	23,50	23,46
1	22,84	22,81	22,77	22,73	22,67	22,62	22,56	22,52	22,48
2	22,90	22,85	22,79	22,74	22,69	22,64	22,60	22,58	22,55
3	23,04	22,99	22,93	22,88	22,83	22,79	22,76	22,73	22,71
4	22,78	22,73	22,68	22,63	22,57	22,52	22,48	22,44	22,41
5	22,55	22,50	22,44	22,38	22,32	22,26	22,21	22,18	22,14
6	24,44	24,36	24,31	24,28	24,27	24,28	24,30	24,31	24,34
7	26,74	26,71	26,71	26,73	26,79	26,85	26,91	26,97	27,03
8	30,11	30,13	30,20	30,30	30,44	30,58	30,73	30,85	30,97
9	32,41	32,53	32,67	32,84	33,03	33,21	33,39	33,52	33,66
10	33,54	33,72	33,92	34,12	34,34	34,53	34,72	34,85	34,98
11	33,92	33,99	34,07	34,15	34,23	34,29	34,35	34,39	34,42
12	39,70	39,88	40,13	40,45	40,84	41,21	41,58	41,88	42,18
13	50,11	50,42	50,85	51,41	52,08	52,71	53,35	53,84	54,35
14	54,79	55,40	56,07	56,79	57,56	58,22	58,87	59,35	59,82
15	55,72	56,47	57,24	58,01	58,79	59,43	60,05	60,49	60,90
16	47,92	48,75	49,49	50,14	50,68	51,08	51,42	51,64	51,79
17	33,74	34,41	34,92	35,25	35,42	35,45	35,42	35,35	35,21
18	31,67	31,90	32,11	32,30	32,46	32,57	32,68	32,74	32,79
19	27,96	28,15	28,30	28,41	28,47	28,49	28,50	28,49	28,46
20	26,27	26,36	26,42	26,47	26,49	26,50	26,50	26,49	26,48
21	25,80	25,84	25,87	25,89	25,91	25,92	25,93	25,94	25,94
22	24,75	24,78	24,79	24,79	24,78	24,77	24,75	24,73	24,71
23	24,56	24,56	24,55	24,54	24,53	24,52	24,51	24,50	24,49

APÊNDICE C

RESULTADOS DAS TENSÕES

Nas Tabelas C.1 à C.6 são apresentados os valores das tensões (S_x , S_y , S_{xy} , S_1 e S_2) nas camadas da seção estudada (Seção A-A' da Figura 6.1) do sistema de revestimento cerâmico, no método de elementos finitos, para o CASO-1 (cerâmica clara e temperatura interna de 18,0°C).

Tabela C.1 – Caso 1: Tensão S_x

Hora	SXn40	SXn278	SXn516	SXn754	SXn992	SXn1230	SXn1468	SXn1706	SXn1944
1	-0,1819	-0,1845	-0,1928	-0,2094	-0,2472	-0,1469	-0,2910	-0,5628	-0,6471
2	-0,1400	-0,1516	-0,1642	-0,1797	-0,2082	-0,1201	-0,2318	-0,4352	-0,4929
3	-0,1439	-0,1535	-0,1649	-0,1800	-0,2093	-0,1214	-0,2356	-0,4451	-0,5059
4	-0,1509	-0,1605	-0,1722	-0,1878	-0,2181	-0,1265	-0,2454	-0,4634	-0,5268
5	-0,1383	-0,1483	-0,1597	-0,1745	-0,2025	-0,1172	-0,2270	-0,4277	-0,4855
6	-0,1270	-0,1364	-0,1472	-0,1610	-0,1871	-0,1085	-0,2103	-0,3968	-0,4505
7	-0,2026	-0,2114	-0,2242	-0,2434	-0,2833	-0,1650	-0,3217	-0,6105	-0,6966
8	-0,3045	-0,3174	-0,3358	-0,3638	-0,4221	-0,2451	-0,4767	-0,9021	-1,0289
9	-0,4617	-0,4801	-0,5068	-0,5479	-0,6345	-0,3678	-0,7146	-1,3501	-1,5399
10	-0,5659	-0,5925	-0,6277	-0,6788	-0,7840	-0,4524	-0,8760	-1,6480	-1,8762
11	-0,6159	-0,6480	-0,6884	-0,7447	-0,8586	-0,4943	-0,9549	-1,7916	-2,0371
12	-0,6312	-0,6660	-0,7086	-0,7668	-0,8835	-0,5079	-0,9803	-1,8367	-2,0869
13	-0,8278	-0,8636	-0,9126	-0,9855	-1,1377	-0,6566	-1,2719	-2,3933	-2,7260
14	-1,1597	-1,2061	-1,2721	-1,3725	-1,5849	-0,9153	-1,7742	-3,3409	-3,8079
15	-1,3120	-1,3755	-1,4574	-1,5738	-1,8128	-1,0426	-2,0139	-3,7762	-4,2953
16	-1,3369	-1,4086	-1,4964	-1,6170	-1,8602	-1,0677	-2,0583	-3,8508	-4,3749
17	-1,0852	-1,1580	-1,2389	-1,3413	-1,5384	-0,8785	-1,6858	-3,1367	-3,5525
18	-0,6367	-0,6962	-0,7549	-0,8205	-0,9366	-0,5302	-1,0092	-1,8593	-2,0939
19	-0,5583	-0,5947	-0,6358	-0,6890	-0,7921	-0,4537	-0,8727	-1,6289	-1,8465
20	-0,3804	-0,4119	-0,4447	-0,4835	-0,5544	-0,3160	-0,6047	-1,1222	-1,2676
21	-0,3020	-0,3244	-0,3487	-0,3791	-0,4363	-0,2500	-0,4807	-0,8971	-1,0158
22	-0,2814	-0,2995	-0,3206	-0,3482	-0,4019	-0,2313	-0,4464	-0,8370	-0,9500
23	-0,2305	-0,2475	-0,2663	-0,2900	-0,3345	-0,1923	-0,3704	-0,6933	-0,7856
24	-0,2227	-0,2370	-0,2539	-0,2761	-0,3193	-0,1843	-0,3562	-0,6693	-0,7601

Tabela C.2 – Caso 1: Tensão S_y

Hora	SYn40	SYn278	SYn516	SYn754	SYn992	SYn1230	SYn1468	SYn1706	SYn1944
1	-0,0186	-0,0189	-0,0206	-0,0245	-0,0320	-0,0366	-0,0025	0,0134	0,0060
2	-0,0145	-0,0148	-0,0161	-0,0190	-0,0247	-0,0280	0,0000	0,0124	0,0043
3	-0,0148	-0,0151	-0,0164	-0,0194	-0,0253	-0,0287	-0,0004	0,0122	0,0045
4	-0,0155	-0,0157	-0,0171	-0,0202	-0,0263	-0,0299	-0,0004	0,0128	0,0046
5	-0,0143	-0,0145	-0,0158	-0,0187	-0,0243	-0,0275	-0,0002	0,0119	0,0043
6	-0,0132	-0,0134	-0,0146	-0,0173	-0,0225	-0,0255	-0,0003	0,0110	0,0040
7	-0,0204	-0,0207	-0,0225	-0,0267	-0,0348	-0,0395	-0,0009	0,0163	0,0061
8	-0,0302	-0,0307	-0,0334	-0,0395	-0,0514	-0,0583	-0,0009	0,0246	0,0089
9	-0,0453	-0,0460	-0,0501	-0,0592	-0,0770	-0,0872	-0,0010	0,0372	0,0132
10	-0,0554	-0,0563	-0,0612	-0,0723	-0,0939	-0,1062	-0,0002	0,0465	0,0159
11	-0,0603	-0,0613	-0,0666	-0,0787	-0,1021	-0,1154	0,0005	0,0513	0,0172
12	-0,0618	-0,0628	-0,0683	-0,0807	-0,1047	-0,1182	0,0009	0,0530	0,0175
13	-0,0805	-0,0818	-0,0889	-0,1051	-0,1365	-0,1543	-0,0003	0,0675	0,0231
14	-0,1124	-0,1142	-0,1242	-0,1468	-0,1906	-0,2156	-0,0008	0,0939	0,0322
15	-0,1272	-0,1293	-0,1405	-0,1660	-0,2154	-0,2432	0,0016	0,1086	0,0359
16	-0,1298	-0,1319	-0,1434	-0,1694	-0,2196	-0,2477	0,0029	0,1121	0,0364
17	-0,1060	-0,1077	-0,1170	-0,1381	-0,1788	-0,2013	0,0050	0,0940	0,0293
18	-0,0630	-0,0640	-0,0695	-0,0819	-0,1058	-0,1187	0,0057	0,0585	0,0169
19	-0,0549	-0,0558	-0,0606	-0,0716	-0,0928	-0,1046	0,0018	0,0480	0,0154
20	-0,0379	-0,0385	-0,0418	-0,0493	-0,0639	-0,0719	0,0022	0,0340	0,0105
21	-0,0302	-0,0307	-0,0333	-0,0394	-0,0511	-0,0576	0,0010	0,0264	0,0086
22	-0,0281	-0,0286	-0,0311	-0,0367	-0,0477	-0,0538	0,0003	0,0240	0,0081
23	-0,0233	-0,0237	-0,0257	-0,0304	-0,0394	-0,0445	0,0004	0,0201	0,0067
24	-0,0224	-0,0228	-0,0248	-0,0293	-0,0381	-0,0431	0,0000	0,0190	0,0066

Tabela C.3 – Caso 1: Tensão de cisalhamento S_{xy}

Hora	SXYn40	SXYn278	SXYn516	SXYn754	SXYn992	SXYn1230	SXYn1468	SXYn1706	SXYn1944
1	0,0002	0,0007	0,0017	0,0028	0,0037	0,0016	-0,0319	0,0054	0,0028
2	0,0002	0,0006	0,0014	0,0023	0,0029	0,0012	-0,0257	0,0044	0,0033
3	0,0002	0,0006	0,0014	0,0023	0,0030	0,0012	-0,0261	0,0044	0,0031
4	0,0002	0,0006	0,0015	0,0024	0,0031	0,0013	-0,0272	0,0046	0,0033
5	0,0002	0,0006	0,0014	0,0022	0,0029	0,0012	-0,0251	0,0043	0,0031
6	0,0002	0,0005	0,0013	0,0020	0,0027	0,0011	-0,0233	0,0040	0,0028
7	0,0003	0,0008	0,0019	0,0032	0,0041	0,0017	-0,0356	0,0060	0,0041
8	0,0004	0,0012	0,0029	0,0047	0,0061	0,0026	-0,0528	0,0089	0,0064
9	0,0006	0,0019	0,0044	0,0071	0,0092	0,0039	-0,0791	0,0133	0,0099
10	0,0008	0,0023	0,0054	0,0087	0,0113	0,0047	-0,0971	0,0164	0,0127
11	0,0008	0,0025	0,0059	0,0095	0,0123	0,0051	-0,1060	0,0179	0,0142
12	0,0009	0,0026	0,0060	0,0097	0,0126	0,0052	-0,1089	0,0184	0,0148
13	0,0011	0,0033	0,0078	0,0126	0,0164	0,0068	-0,1410	0,0238	0,0185
14	0,0015	0,0046	0,0109	0,0176	0,0229	0,0096	-0,1967	0,0331	0,0257
15	0,0018	0,0053	0,0124	0,0200	0,0259	0,0107	-0,2236	0,0377	0,0305
16	0,0018	0,0054	0,0127	0,0205	0,0265	0,0109	-0,2287	0,0386	0,0318
17	0,0015	0,0044	0,0104	0,0168	0,0216	0,0088	-0,1877	0,0318	0,0274
18	0,0009	0,0027	0,0062	0,0100	0,0129	0,0051	-0,1127	0,0192	0,0178
19	0,0008	0,0023	0,0054	0,0087	0,0112	0,0046	-0,0970	0,0164	0,0137
20	0,0005	0,0016	0,0037	0,0060	0,0077	0,0031	-0,0674	0,0114	0,0099
21	0,0004	0,0012	0,0029	0,0047	0,0061	0,0025	-0,0534	0,0091	0,0075
22	0,0004	0,0012	0,0027	0,0044	0,0057	0,0023	-0,0496	0,0084	0,0066
23	0,0003	0,0010	0,0023	0,0036	0,0047	0,0019	-0,0411	0,0070	0,0055
24	0,0003	0,0009	0,0022	0,0035	0,0045	0,0019	-0,0395	0,0067	0,0051

Tabela C.4 – Caso 1: Tensão S_1

Hora	S1n40	S1n278	S1n516	S1n754	S1n992	S1n1230	S1n1468	S1n1706	S1n1944
1	-0,0186	-0,0189	-0,0206	-0,0244	-0,0320	-0,0366	0,0010	0,0135	0,0060
2	-0,0145	-0,0148	-0,0161	-0,0190	-0,0247	-0,0279	0,0028	0,0124	0,0043
3	-0,0148	-0,0151	-0,0164	-0,0194	-0,0252	-0,0287	0,0025	0,0123	0,0045
4	-0,0155	-0,0157	-0,0171	-0,0202	-0,0263	-0,0298	0,0026	0,0128	0,0047
5	-0,0143	-0,0145	-0,0158	-0,0187	-0,0243	-0,0275	0,0025	0,0119	0,0043
6	-0,0132	-0,0134	-0,0146	-0,0173	-0,0225	-0,0255	0,0023	0,0110	0,0040
7	-0,0204	-0,0207	-0,0225	-0,0266	-0,0347	-0,0394	0,0030	0,0164	0,0062
8	-0,0302	-0,0307	-0,0334	-0,0394	-0,0513	-0,0582	0,0049	0,0247	0,0090
9	-0,0453	-0,0460	-0,0500	-0,0591	-0,0768	-0,0871	0,0076	0,0373	0,0133
10	-0,0554	-0,0563	-0,0612	-0,0722	-0,0938	-0,1062	0,0105	0,0467	0,0160
11	-0,0603	-0,0612	-0,0665	-0,0786	-0,1019	-0,1153	0,0122	0,0515	0,0173
12	-0,0618	-0,0628	-0,0682	-0,0806	-0,1045	-0,1181	0,0129	0,0532	0,0176
13	-0,0805	-0,0818	-0,0889	-0,1049	-0,1362	-0,1542	0,0152	0,0677	0,0232
14	-0,1124	-0,1141	-0,1241	-0,1465	-0,1902	-0,2154	0,0208	0,0942	0,0324
15	-0,1272	-0,1292	-0,1404	-0,1657	-0,2149	-0,2431	0,0261	0,1089	0,0361
16	-0,1298	-0,1319	-0,1433	-0,1691	-0,2192	-0,2476	0,0280	0,1124	0,0367
17	-0,1060	-0,1076	-0,1169	-0,1378	-0,1784	-0,2012	0,0256	0,0943	0,0295
18	-0,0630	-0,0640	-0,0695	-0,0818	-0,1056	-0,1187	0,0181	0,0587	0,0171
19	-0,0549	-0,0558	-0,0606	-0,0715	-0,0926	-0,1046	0,0124	0,0482	0,0155
20	-0,0379	-0,0385	-0,0418	-0,0493	-0,0637	-0,0718	0,0096	0,0342	0,0106
21	-0,0302	-0,0307	-0,0333	-0,0393	-0,0510	-0,0575	0,0068	0,0265	0,0086
22	-0,0281	-0,0286	-0,0310	-0,0367	-0,0476	-0,0538	0,0057	0,0241	0,0082
23	-0,0233	-0,0236	-0,0257	-0,0303	-0,0394	-0,0445	0,0049	0,0201	0,0068
24	-0,0224	-0,0228	-0,0248	-0,0293	-0,0380	-0,0430	0,0043	0,0190	0,0066

Tabela C.5 – Caso 1: Tensão S_2

Hora	S2n40	S2n278	S2n516	S2n754	S2n992	S2n1230	S2n1468	S2n1706	S2n1944
1	-0,1819	-0,1845	-0,1928	-0,2095	-0,2473	-0,1469	-0,1945	-0,2594	-0,2824
2	-0,1400	-0,1516	-0,1643	-0,1798	-0,2082	-0,1201	-0,1575	-0,2049	-0,2195
3	-0,1439	-0,1535	-0,1649	-0,1801	-0,2093	-0,1215	-0,1596	-0,2087	-0,2244
4	-0,1509	-0,1605	-0,1722	-0,1878	-0,2181	-0,1265	-0,1663	-0,2175	-0,2338
5	-0,1383	-0,1483	-0,1597	-0,1745	-0,2025	-0,1172	-0,1540	-0,2009	-0,2157
6	-0,1270	-0,1364	-0,1472	-0,1611	-0,1872	-0,1085	-0,1424	-0,1861	-0,1998
7	-0,2026	-0,2114	-0,2242	-0,2434	-0,2833	-0,1651	-0,2177	-0,2858	-0,3085
8	-0,3045	-0,3174	-0,3359	-0,3638	-0,4222	-0,2451	-0,3236	-0,4239	-0,4571
9	-0,4617	-0,4801	-0,5068	-0,5480	-0,6347	-0,3678	-0,4859	-0,6357	-0,6856
10	-0,5659	-0,5925	-0,6278	-0,6789	-0,7841	-0,4525	-0,5972	-0,7787	-0,8380
11	-0,6159	-0,6480	-0,6884	-0,7448	-0,8588	-0,4943	-0,6520	-0,8483	-0,9116
12	-0,6312	-0,6660	-0,7086	-0,7670	-0,8837	-0,5080	-0,6697	-0,8705	-0,9347
13	-0,8278	-0,8636	-0,9126	-0,9856	-1,1380	-0,6567	-0,8674	-1,1313	-1,2180
14	-1,1598	-1,2061	-1,2722	-1,3728	-1,5853	-0,9154	-1,2098	-1,5788	-1,7009
15	-1,3120	-1,3756	-1,4575	-1,5741	-1,8132	-1,0428	-1,3764	-1,7902	-1,9244
16	-1,3369	-1,4086	-1,4965	-1,6173	-1,8606	-1,0678	-1,4084	-1,8285	-1,9630
17	-1,0852	-1,1581	-1,2390	-1,3416	-1,5388	-0,8786	-1,1565	-1,4951	-1,5998
18	-0,6367	-0,6962	-0,7549	-0,8206	-0,9368	-0,5303	-0,6954	-0,8919	-0,9488
19	-0,5583	-0,5947	-0,6359	-0,6892	-0,7923	-0,4537	-0,5974	-0,7741	-0,8292
20	-0,3804	-0,4119	-0,4448	-0,4836	-0,5545	-0,3160	-0,4149	-0,5351	-0,5711
21	-0,3020	-0,3244	-0,3488	-0,3792	-0,4364	-0,2500	-0,3286	-0,4257	-0,4556
22	-0,2814	-0,2995	-0,3206	-0,3483	-0,4020	-0,2313	-0,3044	-0,3958	-0,4247
23	-0,2305	-0,2475	-0,2663	-0,2900	-0,3346	-0,1923	-0,2526	-0,3280	-0,3514
24	-0,2227	-0,2370	-0,2539	-0,2762	-0,3194	-0,1843	-0,2424	-0,3158	-0,3390

Nas Tabelas C.6 à C.10 são apresentados os valores das tensões (S_x , S_y , S_{xy} , S_1 e S_2) nas camadas da seção estudada (Seção A-A' da Figura 6.1) do sistema de revestimento cerâmico, no método de elementos finitos, para o CASO-2 (cerâmica clara e temperatura interna de 25,0°C).

Tabela C.6 – Caso 2: Tensão S_x

Hora	SXn40	SXn278	SXn516	SXn754	SXn992	SXn1230	SXn1468	SXn1706	SXn1944
1	0,0663	0,0659	0,0673	0,0716	0,0828	0,0481	0,0942	0,1790	0,2058
2	0,1070	0,1097	0,1143	0,1221	0,1399	0,0802	0,1548	0,2898	0,3306
3	0,1031	0,1079	0,1137	0,1219	0,1389	0,0789	0,1510	0,2798	0,3175
4	0,1597	0,1509	0,1437	0,1389	0,1413	0,0696	0,1211	0,1897	0,2136
5	0,1088	0,1146	0,1210	0,1295	0,1471	0,0833	0,1593	0,2946	0,3345
6	0,1206	0,1254	0,1318	0,1411	0,1611	0,0918	0,1762	0,3274	0,3721
7	0,0516	0,0574	0,0625	0,0676	0,0759	0,0420	0,0784	0,1410	0,1573
8	-0,0499	-0,0468	-0,0462	-0,0487	-0,0572	-0,0342	-0,0685	-0,1336	-0,1556
9	-0,2097	-0,2110	-0,2174	-0,2318	-0,2672	-0,1546	-0,3010	-0,5689	-0,6521
10	-0,3157	-0,3244	-0,3386	-0,3621	-0,4150	-0,2377	-0,4588	-0,8581	-0,9785
11	-0,3661	-0,3799	-0,3988	-0,4270	-0,4878	-0,2781	-0,5346	-0,9947	-1,1313
12	-0,3810	-0,3974	-0,4183	-0,4483	-0,5116	-0,2911	-0,5585	-1,0369	-1,1779
13	-0,5373	-0,5535	-0,5785	-0,6188	-0,7084	-0,4053	-0,7813	-1,4593	-1,6628
14	-0,7884	-0,8110	-0,8470	-0,9058	-1,0375	-0,5940	-1,1460	-2,1421	-2,4418
15	-0,8945	-0,9291	-0,9757	-1,0449	-1,1937	-0,6803	-1,3071	-2,4313	-2,7646
16	-0,9396	-0,9684	-1,0074	-1,0669	-1,2024	-0,6744	-1,2821	-2,3481	-2,6643
17	-0,7381	-0,7802	-0,8273	-0,8879	-1,0097	-0,5711	-1,0898	-2,0104	-2,2763
18	-0,4025	-0,4379	-0,4717	-0,5084	-0,5741	-0,3207	-0,6049	-1,0998	-1,2356
19	-0,3260	-0,3448	-0,3657	-0,3926	-0,4463	-0,2523	-0,4813	-0,8872	-1,0039
20	-0,1415	-0,1573	-0,1714	-0,1852	-0,2081	-0,1152	-0,2154	-0,3874	-0,4326
21	-0,0607	-0,0676	-0,0737	-0,0796	-0,0893	-0,0494	-0,0922	-0,1654	-0,1844
22	-0,0388	-0,0417	-0,0447	-0,0482	-0,0546	-0,0307	-0,0583	-0,1069	-0,1205
23	0,0134	0,0113	0,0103	0,0106	0,0130	0,0082	0,0173	0,0354	0,0422
24	0,0219	0,0223	0,0232	0,0247	0,0283	0,0162	0,0313	0,0584	0,0667

Tabela C.7 – Caso 2: Tensão S_y

Hora	SYn40	SYn278	SYn516	SYn754	SYn992	SYn1230	SYn1468	SYn1706	SYn1944
1	0,0060	0,0061	0,0067	0,0079	0,0103	0,0116	0,0003	-0,0048	-0,0017
2	0,0098	0,0100	0,0109	0,0128	0,0166	0,0187	-0,0002	-0,0085	-0,0026
3	0,0095	0,0097	0,0105	0,0124	0,0160	0,0180	-0,0007	-0,0086	-0,0025
4	0,0078	0,0079	0,0084	0,0095	0,0115	0,0118	-0,0064	-0,0119	0,0006
5	0,0101	0,0102	0,0111	0,0131	0,0169	0,0189	-0,0008	-0,0091	-0,0026
6	0,0111	0,0113	0,0123	0,0145	0,0187	0,0210	-0,0006	-0,0099	-0,0029
7	0,0049	0,0049	0,0053	0,0063	0,0080	0,0089	-0,0010	-0,0050	-0,0011
8	-0,0045	-0,0045	-0,0049	-0,0059	-0,0077	-0,0088	-0,0007	0,0031	0,0014
9	-0,0192	-0,0195	-0,0212	-0,0251	-0,0326	-0,0368	-0,0004	0,0157	0,0054
10	-0,0291	-0,0296	-0,0321	-0,0379	-0,0491	-0,0553	0,0008	0,0251	0,0078
11	-0,0338	-0,0344	-0,0373	-0,0440	-0,0569	-0,0640	0,0017	0,0299	0,0090
12	-0,0353	-0,0358	-0,0389	-0,0459	-0,0593	-0,0666	0,0021	0,0316	0,0093
13	-0,0495	-0,0503	-0,0547	-0,0645	-0,0835	-0,0940	0,0017	0,0431	0,0133
14	-0,0727	-0,0738	-0,0802	-0,0947	-0,1226	-0,1381	0,0022	0,0630	0,0196
15	-0,0827	-0,0840	-0,0912	-0,1075	-0,1391	-0,1564	0,0043	0,0733	0,0219
16	-0,0811	-0,0823	-0,0892	-0,1049	-0,1349	-0,1505	0,0103	0,0771	0,0190
17	-0,0686	-0,0697	-0,0756	-0,0890	-0,1149	-0,1288	0,0061	0,0632	0,0176
18	-0,0377	-0,0383	-0,0415	-0,0488	-0,0628	-0,0700	0,0058	0,0371	0,0092
19	-0,0303	-0,0307	-0,0334	-0,0393	-0,0507	-0,0568	0,0028	0,0280	0,0078
20	-0,0133	-0,0136	-0,0147	-0,0172	-0,0221	-0,0245	0,0027	0,0138	0,0031
21	-0,0057	-0,0058	-0,0063	-0,0074	-0,0094	-0,0105	0,0012	0,0059	0,0013
22	-0,0037	-0,0037	-0,0040	-0,0047	-0,0061	-0,0068	0,0004	0,0035	0,0009
23	0,0012	0,0012	0,0013	0,0015	0,0020	0,0024	0,0004	-0,0006	-0,0004
24	0,0020	0,0020	0,0022	0,0026	0,0033	0,0038	-0,0001	-0,0017	-0,0005

Tabela C.8 – Caso 2: Tensão S_{xy}

Hora	SX _{Yn40}	SX _{Yn278}	SX _{Yn516}	SX _{Yn754}	SX _{Yn992}	SX _{Yn1230}	SX _{Yn1468}	SX _{Yn1706}	SX _{Yn1944}
1	-8,27E-05	-0,000249	-0,000586	-0,000949	-0,001236	-0,000536	0,010412	-0,001725	-0,001311
2	-0,000137	-0,000412	-0,000969	-0,001563	-0,002019	-0,000842	0,017207	-0,002874	-0,002501
3	-0,000134	-0,000404	-0,000948	-0,001526	-0,00196	-0,000796	0,016843	-0,002828	-0,002663
4	-0,00015	-0,000448	-0,001028	-0,001575	-0,001851	-0,000645	0,014301	-0,002147	-0,006463
5	-0,000142	-0,000428	-0,001004	-0,001614	-0,002071	-0,00084	0,017777	-0,00298	-0,002866
6	-0,000157	-0,00047	-0,001104	-0,001779	-0,002289	-0,000938	0,019625	-0,00329	-0,003022
7	-7,09E-05	-0,000213	-0,000498	-0,000795	-0,001004	-0,000375	0,008837	-0,001501	-0,001729
8	5,93E-05	0,000178	0,000422	0,000688	0,00091	0,00042	-0,007499	0,001228	0,00068
9	0,000265	0,000796	0,001874	0,003032	0,003938	0,001683	-0,033335	0,005546	0,004409
10	0,000406	0,001219	0,002867	0,004626	0,005975	0,002487	-0,050998	0,00853	0,007422
11	0,000474	0,001425	0,003348	0,005395	0,006948	0,002855	-0,059523	0,009978	0,009057
12	0,000496	0,00149	0,0035	0,005636	0,007249	0,002961	-0,062236	0,010446	0,009636
13	0,000692	0,002078	0,004887	0,007881	0,010171	0,004218	-0,086892	0,014537	0,012825
14	0,001014	0,003047	0,007165	0,011557	0,014921	0,006201	-0,127404	0,021306	0,018662
15	0,00116	0,003484	0,008188	0,01319	0,016984	0,006971	-0,145564	0,024402	0,022221
16	0,001176	0,003528	0,008268	0,013241	0,016873	0,006779	-0,143605	0,023892	0,026043
17	0,000972	0,002917	0,006849	0,011009	0,01411	0,005668	-0,121712	0,020482	0,019847
18	0,000543	0,00163	0,003819	0,006118	0,007779	0,003004	-0,067894	0,011509	0,012258
19	0,000429	0,001289	0,003025	0,004861	0,006227	0,002495	-0,053765	0,009049	0,008825
20	0,000195	0,000583	0,001365	0,002181	0,002756	0,001032	-0,024262	0,00413	0,004703
21	8,34E-05	0,00025	0,000585	0,000934	0,001179	0,000439	-0,01039	0,001767	0,002054
22	5,2E-05	0,000156	0,000366	0,000588	0,000751	0,000295	-0,006529	0,0011	0,001117
23	-1,45E-05	-4,38E-05	-0,000104	-0,000173	-0,000235	-0,000121	0,001855	-0,000297	-3,73E-05
24	-2,78E-05	-8,34E-05	-0,000196	-0,000316	-0,000408	-0,000171	0,003475	-0,000582	-0,000509

Tabela C.9 – Caso 2: Tensão S_1

Hora	S1n40	S1n278	S1n516	S1n754	S1n992	S1n1230	S1n1468	S1n1706	S1n1944
1	0,0979	0,0973	0,0981	0,1006	0,1058	0,0559	0,0953	0,1790	0,2058
2	0,1600	0,1623	0,1658	0,1707	0,1787	0,0936	0,1567	0,2898	0,3306
3	0,1553	0,1598	0,1645	0,1699	0,1773	0,0924	0,1529	0,2798	0,3175
4	0,2207	0,2116	0,2035	0,1963	0,1912	0,0926	0,1227	0,1897	0,2138
5	0,1642	0,1696	0,1748	0,1804	0,1880	0,0978	0,1612	0,2947	0,3345
6	0,1813	0,1857	0,1908	0,1969	0,2057	0,1074	0,1783	0,3274	0,3721
7	0,0796	0,0852	0,0898	0,0934	0,0968	0,0496	0,0794	0,1410	0,1574
8	-0,0045	-0,0045	-0,0049	-0,0059	-0,0077	-0,0088	0,0001	0,0031	0,0014
9	-0,0192	-0,0195	-0,0212	-0,0250	-0,0325	-0,0368	0,0033	0,0158	0,0054
10	-0,0291	-0,0296	-0,0321	-0,0378	-0,0490	-0,0553	0,0064	0,0252	0,0079
11	-0,0338	-0,0343	-0,0373	-0,0439	-0,0568	-0,0639	0,0082	0,0300	0,0090
12	-0,0353	-0,0358	-0,0389	-0,0458	-0,0592	-0,0666	0,0090	0,0317	0,0094
13	-0,0495	-0,0503	-0,0546	-0,0644	-0,0833	-0,0940	0,0112	0,0432	0,0134
14	-0,0727	-0,0738	-0,0802	-0,0945	-0,1223	-0,1380	0,0162	0,0632	0,0197
15	-0,0827	-0,0840	-0,0911	-0,1073	-0,1388	-0,1563	0,0203	0,0735	0,0220
16	-0,0811	-0,0823	-0,0892	-0,1047	-0,1346	-0,1504	0,0261	0,0773	0,0193
17	-0,0686	-0,0697	-0,0755	-0,0889	-0,1147	-0,1287	0,0195	0,0634	0,0178
18	-0,0377	-0,0383	-0,0415	-0,0487	-0,0627	-0,0700	0,0133	0,0372	0,0093
19	-0,0303	-0,0307	-0,0333	-0,0392	-0,0506	-0,0568	0,0087	0,0281	0,0079
20	-0,0133	-0,0136	-0,0147	-0,0172	-0,0221	-0,0245	0,0054	0,0138	0,0032
21	-0,0057	-0,0058	-0,0063	-0,0073	-0,0094	-0,0105	0,0024	0,0060	0,0014
22	-0,0037	-0,0037	-0,0040	-0,0047	-0,0061	-0,0068	0,0012	0,0035	0,0009
23	0,0187	0,0166	0,0154	0,0154	0,0166	0,0093	0,0175	0,0354	0,0422
24	0,0326	0,0330	0,0336	0,0346	0,0361	0,0189	0,0316	0,0584	0,0667

Tabela C.10 – Caso 2: Tensão S_2

Hora	S2n40	S2n278	S2n516	S2n754	S2n992	S2n1230	S2n1468	S2n1706	S2n1944
1	0,0663	0,0659	0,0673	0,0716	0,0828	0,0482	0,0642	0,0845	0,0918
2	0,1070	0,1097	0,1143	0,1221	0,1399	0,0802	0,1064	0,1383	0,1490
3	0,1031	0,1079	0,1137	0,1219	0,1389	0,0789	0,1043	0,1345	0,1441
4	0,1597	0,1509	0,1437	0,1389	0,1413	0,0696	0,0970	0,1129	0,1186
5	0,1088	0,1146	0,1210	0,1295	0,1472	0,0833	0,1102	0,1419	0,1521
6	0,1206	0,1254	0,1318	0,1412	0,1612	0,0918	0,1215	0,1570	0,1685
7	0,0516	0,0574	0,0625	0,0676	0,0759	0,0420	0,0550	0,0692	0,0729
8	-0,0499	-0,0468	-0,0462	-0,0487	-0,0572	-0,0342	-0,0461	-0,0619	-0,0682
9	-0,2097	-0,2110	-0,2175	-0,2318	-0,2672	-0,1546	-0,2058	-0,2694	-0,2918
10	-0,3157	-0,3244	-0,3387	-0,3622	-0,4151	-0,2378	-0,3153	-0,4095	-0,4410
11	-0,3661	-0,3799	-0,3988	-0,4270	-0,4879	-0,2782	-0,3684	-0,4764	-0,5117
12	-0,3810	-0,3974	-0,4184	-0,4484	-0,5118	-0,2912	-0,3853	-0,4974	-0,5335
13	-0,5373	-0,5536	-0,5786	-0,6189	-0,7086	-0,4053	-0,5374	-0,6971	-0,7502
14	-0,7884	-0,8110	-0,8470	-0,9060	-1,0378	-0,5941	-0,7879	-1,0226	-1,1010
15	-0,8945	-0,9291	-0,9758	-1,0451	-1,1939	-0,6804	-0,9009	-1,1648	-1,2508
16	-0,9396	-0,9684	-1,0075	-1,0671	-1,2026	-0,6745	-0,8963	-1,1459	-1,2263
17	-0,7382	-0,7803	-0,8273	-0,8881	-1,0099	-0,5712	-0,7543	-0,9689	-1,0358
18	-0,4025	-0,4379	-0,4717	-0,5085	-0,5742	-0,3208	-0,4216	-0,5356	-0,5679
19	-0,3260	-0,3448	-0,3657	-0,3926	-0,4464	-0,2523	-0,3332	-0,4278	-0,4570
20	-0,1415	-0,1573	-0,1714	-0,1852	-0,2081	-0,1152	-0,1509	-0,1901	-0,2004
21	-0,0607	-0,0676	-0,0737	-0,0797	-0,0893	-0,0494	-0,0647	-0,0814	-0,0856
22	-0,0388	-0,0417	-0,0447	-0,0482	-0,0546	-0,0307	-0,0405	-0,0517	-0,0550
23	0,0134	0,0113	0,0103	0,0106	0,0130	0,0082	0,0113	0,0158	0,0180
24	0,0219	0,0223	0,0232	0,0247	0,0283	0,0162	0,0215	0,0279	0,0301

Nas Tabelas C.11 à C.15 são apresentados os valores das tensões (S_x , S_y , S_{xy} , S_1 e S_2) nas camadas da seção estudada (Seção A-A' da Figura 6.1) do sistema de revestimento cerâmico, no método de elementos finitos, para o CASO-3 (cerâmica escura e temperatura interna de 18,0°C).

Tabela C.11 – Caso 3: Tensão S_x

Hora	SXn40	SXn278	SXn516	SXn754	SXn992	SXn1230	SXn1468	SXn1706	SXn1944
1	-0,1819	-0,1845	-0,1928	-0,2094	-0,2472	-0,1469	-0,2910	-0,5628	-0,6471
2	-0,1400	-0,1516	-0,1642	-0,1797	-0,2082	-0,1201	-0,2318	-0,4352	-0,4929
3	-0,1439	-0,1535	-0,1649	-0,1800	-0,2093	-0,1214	-0,2356	-0,4451	-0,5059
4	-0,1509	-0,1605	-0,1722	-0,1878	-0,2181	-0,1265	-0,2454	-0,4634	-0,5268
5	-0,1383	-0,1483	-0,1597	-0,1745	-0,2025	-0,1172	-0,2270	-0,4277	-0,4855
6	-0,1270	-0,1364	-0,1472	-0,1610	-0,1871	-0,1085	-0,2103	-0,3968	-0,4505
7	-0,2369	-0,2459	-0,2596	-0,2815	-0,3276	-0,1911	-0,3729	-0,7087	-0,8094
8	-0,3556	-0,3703	-0,3915	-0,4237	-0,4913	-0,2850	-0,5542	-1,0480	-1,1954
9	-0,5220	-0,5430	-0,5732	-0,6194	-0,7168	-0,4150	-0,8057	-1,5207	-1,7341
10	-0,6338	-0,6636	-0,7030	-0,7600	-0,8774	-0,5061	-0,9797	-1,8422	-2,0971
11	-0,6892	-0,7249	-0,7698	-0,8325	-0,9596	-0,5522	-1,0667	-2,0007	-2,2748
12	-0,7084	-0,7470	-0,7944	-0,8593	-0,9897	-0,5688	-1,0975	-2,0557	-2,3358
13	-1,0842	-1,1243	-1,1838	-1,2768	-1,4757	-0,8534	-1,6563	-3,1235	-3,5625
14	-1,7726	-1,8327	-1,9262	-2,0758	-2,3991	-1,3879	-2,6949	-5,0847	-5,8026
15	-2,0829	-2,1789	-2,3052	-2,4876	-2,8654	-1,6484	-3,1852	-5,9748	-6,7990
16	-2,1183	-2,2308	-2,3686	-2,5584	-2,9416	-1,6873	-3,2520	-6,0813	-6,9084
17	-1,5945	-1,7087	-1,8320	-1,9837	-2,2714	-1,2937	-2,4771	-4,5960	-5,1992
18	-0,6518	-0,7380	-0,8145	-0,8887	-1,0059	-0,5613	-1,0539	-1,9090	-2,1304
19	-0,5578	-0,5954	-0,6376	-0,6911	-0,7940	-0,4543	-0,8729	-1,6267	-1,8433
20	-0,3804	-0,4120	-0,4448	-0,4835	-0,5544	-0,3160	-0,6047	-1,1219	-1,2673
21	-0,3020	-0,3244	-0,3487	-0,3791	-0,4363	-0,2500	-0,4807	-0,8969	-1,0156
22	-0,2814	-0,2995	-0,3206	-0,3482	-0,4019	-0,2313	-0,4464	-0,8370	-0,9499
23	-0,2305	-0,2475	-0,2663	-0,2900	-0,3345	-0,1923	-0,3704	-0,6932	-0,7855
24	-0,2227	-0,2370	-0,2539	-0,2761	-0,3194	-0,1843	-0,3562	-0,6694	-0,7601

Tabela C.12 – Caso 3: Tensão S_y

Hora	SYn40	SYn278	SYn516	SYn754	SYn992	SYn1230	SYn1468	SYn1706	SYn1944
1	-0,0186	-0,0189	-0,0206	-0,0245	-0,0320	-0,0366	-0,0025	0,0134	0,0060
2	-0,0145	-0,0148	-0,0161	-0,0190	-0,0247	-0,0280	0,0000	0,0124	0,0043
3	-0,0148	-0,0151	-0,0164	-0,0194	-0,0253	-0,0287	-0,0004	0,0122	0,0045
4	-0,0155	-0,0157	-0,0171	-0,0202	-0,0263	-0,0299	-0,0004	0,0128	0,0046
5	-0,0143	-0,0145	-0,0158	-0,0187	-0,0243	-0,0275	-0,0002	0,0119	0,0043
6	-0,0132	-0,0134	-0,0146	-0,0173	-0,0225	-0,0255	-0,0003	0,0110	0,0040
7	-0,0237	-0,0240	-0,0262	-0,0310	-0,0404	-0,0458	-0,0012	0,0189	0,0071
8	-0,0351	-0,0357	-0,0388	-0,0459	-0,0597	-0,0677	-0,0010	0,0287	0,0103
9	-0,0510	-0,0519	-0,0564	-0,0667	-0,0867	-0,0982	-0,0009	0,0421	0,0148
10	-0,0619	-0,0629	-0,0684	-0,0809	-0,1050	-0,1187	-0,0001	0,0521	0,0178
11	-0,0673	-0,0684	-0,0744	-0,0879	-0,1141	-0,1288	0,0007	0,0574	0,0191
12	-0,0692	-0,0703	-0,0765	-0,0903	-0,1172	-0,1323	0,0011	0,0594	0,0196
13	-0,1050	-0,1067	-0,1160	-0,1372	-0,1782	-0,2016	-0,0014	0,0871	0,0302
14	-0,1709	-0,1737	-0,1889	-0,2234	-0,2902	-0,3284	-0,0026	0,1414	0,0492
15	-0,2013	-0,2046	-0,2224	-0,2627	-0,3408	-0,3849	0,0022	0,1715	0,0568
16	-0,2052	-0,2085	-0,2266	-0,2675	-0,3468	-0,3912	0,0051	0,1775	0,0574
17	-0,1555	-0,1580	-0,1716	-0,2024	-0,2619	-0,2946	0,0093	0,1397	0,0424
18	-0,0651	-0,0662	-0,0717	-0,0844	-0,1085	-0,1209	0,0109	0,0652	0,0165
19	-0,0549	-0,0558	-0,0606	-0,0715	-0,0927	-0,1044	0,0021	0,0482	0,0153
20	-0,0379	-0,0385	-0,0418	-0,0493	-0,0638	-0,0718	0,0022	0,0340	0,0105
21	-0,0302	-0,0307	-0,0333	-0,0394	-0,0510	-0,0576	0,0010	0,0264	0,0086
22	-0,0281	-0,0286	-0,0311	-0,0367	-0,0476	-0,0538	0,0003	0,0240	0,0081
23	-0,0233	-0,0236	-0,0257	-0,0304	-0,0394	-0,0445	0,0004	0,0201	0,0067
24	-0,0224	-0,0228	-0,0248	-0,0293	-0,0381	-0,0431	0,0000	0,0190	0,0066

Tabela C.13 – Caso 3: Tensão S_{xy}

Hora	SXYn40	SXYn278	SXYn516	SXYn754	SXYn992	SXYn1230	SXYn1468	SXYn1706	SXYn1944
1	0,0002	0,0007	0,0017	0,0028	0,0037	0,0016	-0,0319	0,0054	0,0028
2	0,0002	0,0006	0,0014	0,0023	0,0029	0,0012	-0,0257	0,0044	0,0033
3	0,0002	0,0006	0,0014	0,0023	0,0030	0,0012	-0,0261	0,0044	0,0031
4	0,0002	0,0006	0,0015	0,0024	0,0031	0,0013	-0,0272	0,0046	0,0033
5	0,0002	0,0006	0,0014	0,0022	0,0029	0,0012	-0,0251	0,0043	0,0031
6	0,0002	0,0005	0,0013	0,0020	0,0027	0,0011	-0,0233	0,0040	0,0028
7	0,0003	0,0010	0,0023	0,0037	0,0048	0,0020	-0,0412	0,0069	0,0047
8	0,0005	0,0014	0,0034	0,0055	0,0071	0,0030	-0,0613	0,0103	0,0075
9	0,0007	0,0021	0,0049	0,0080	0,0104	0,0044	-0,0892	0,0150	0,0113
10	0,0008	0,0025	0,0060	0,0097	0,0126	0,0052	-0,1087	0,0183	0,0143
11	0,0009	0,0028	0,0065	0,0106	0,0137	0,0057	-0,1184	0,0200	0,0160
12	0,0010	0,0029	0,0067	0,0109	0,0141	0,0058	-0,1219	0,0206	0,0167
13	0,0014	0,0043	0,0102	0,0164	0,0214	0,0090	-0,1835	0,0309	0,0236
14	0,0023	0,0070	0,0165	0,0268	0,0348	0,0146	-0,2985	0,0502	0,0384
15	0,0028	0,0083	0,0196	0,0317	0,0410	0,0170	-0,3536	0,0596	0,0481
16	0,0028	0,0085	0,0200	0,0324	0,0418	0,0172	-0,3614	0,0610	0,0507
17	0,0022	0,0065	0,0153	0,0247	0,0317	0,0128	-0,2760	0,0468	0,0413
18	0,0009	0,0028	0,0065	0,0105	0,0133	0,0050	-0,1184	0,0203	0,0211
19	0,0008	0,0023	0,0054	0,0087	0,0112	0,0045	-0,0971	0,0165	0,0138
20	0,0005	0,0016	0,0037	0,0060	0,0077	0,0031	-0,0674	0,0115	0,0099
21	0,0004	0,0012	0,0029	0,0047	0,0061	0,0025	-0,0534	0,0091	0,0075
22	0,0004	0,0012	0,0027	0,0044	0,0057	0,0023	-0,0496	0,0084	0,0066
23	0,0003	0,0010	0,0023	0,0036	0,0047	0,0019	-0,0411	0,0070	0,0055
24	0,0003	0,0009	0,0022	0,0035	0,0045	0,0019	-0,0395	0,0067	0,0051

Tabela C.14 – Caso 3: Tensão S_1

Hora	S1n40	S1n278	S1n516	S1n754	S1n992	S1n1230	S1n1468	S1n1706	S1n1944
1	-0,0186	-0,0189	-0,0206	-0,0244	-0,0320	-0,0366	0,0010	0,0135	0,0060
2	-0,0145	-0,0148	-0,0161	-0,0190	-0,0247	-0,0279	0,0028	0,0124	0,0043
3	-0,0148	-0,0151	-0,0164	-0,0194	-0,0252	-0,0287	0,0025	0,0123	0,0045
4	-0,0155	-0,0157	-0,0171	-0,0202	-0,0263	-0,0298	0,0026	0,0128	0,0047
5	-0,0143	-0,0145	-0,0158	-0,0187	-0,0243	-0,0275	0,0025	0,0119	0,0043
6	-0,0132	-0,0134	-0,0146	-0,0173	-0,0225	-0,0255	0,0023	0,0110	0,0040
7	-0,0237	-0,0240	-0,0262	-0,0309	-0,0403	-0,0458	0,0033	0,0189	0,0072
8	-0,0351	-0,0357	-0,0388	-0,0458	-0,0596	-0,0676	0,0058	0,0288	0,0104
9	-0,0510	-0,0519	-0,0564	-0,0666	-0,0865	-0,0981	0,0089	0,0423	0,0149
10	-0,0619	-0,0629	-0,0684	-0,0808	-0,1048	-0,1187	0,0118	0,0523	0,0179
11	-0,0673	-0,0684	-0,0743	-0,0877	-0,1138	-0,1288	0,0137	0,0576	0,0193
12	-0,0692	-0,0703	-0,0764	-0,0902	-0,1170	-0,1322	0,0145	0,0596	0,0197
13	-0,1050	-0,1066	-0,1159	-0,1369	-0,1778	-0,2015	0,0187	0,0874	0,0304
14	-0,1709	-0,1737	-0,1888	-0,2230	-0,2896	-0,3282	0,0301	0,1419	0,0494
15	-0,2013	-0,2045	-0,2222	-0,2623	-0,3402	-0,3847	0,0409	0,1720	0,0571
16	-0,2052	-0,2084	-0,2264	-0,2671	-0,3461	-0,3910	0,0447	0,1781	0,0577
17	-0,1555	-0,1579	-0,1715	-0,2021	-0,2614	-0,2944	0,0395	0,1402	0,0428
18	-0,0651	-0,0661	-0,0717	-0,0842	-0,1083	-0,1209	0,0239	0,0655	0,0167
19	-0,0549	-0,0557	-0,0605	-0,0714	-0,0925	-0,1044	0,0127	0,0484	0,0154
20	-0,0379	-0,0385	-0,0418	-0,0492	-0,0637	-0,0718	0,0096	0,0342	0,0106
21	-0,0302	-0,0307	-0,0333	-0,0393	-0,0509	-0,0575	0,0068	0,0265	0,0086
22	-0,0281	-0,0286	-0,0310	-0,0366	-0,0475	-0,0538	0,0057	0,0241	0,0082
23	-0,0233	-0,0236	-0,0257	-0,0303	-0,0394	-0,0445	0,0049	0,0201	0,0068
24	-0,0224	-0,0228	-0,0248	-0,0293	-0,0380	-0,0431	0,0043	0,0190	0,0066

Tabela C.15 – Caso 3: Tensão S_2

Hora	S2n40	S2n278	S2n516	S2n754	S2n992	S2n1230	S2n1468	S2n1706	S2n1944
1	-0,1819	-0,1845	-0,1928	-0,2095	-0,2473	-0,1469	-0,1945	-0,2594	-0,2824
2	-0,1400	-0,1516	-0,1643	-0,1798	-0,2082	-0,1201	-0,1575	-0,2049	-0,2195
3	-0,1439	-0,1535	-0,1649	-0,1801	-0,2093	-0,1215	-0,1596	-0,2087	-0,2244
4	-0,1509	-0,1605	-0,1722	-0,1878	-0,2181	-0,1265	-0,1663	-0,2175	-0,2338
5	-0,1383	-0,1483	-0,1597	-0,1745	-0,2025	-0,1172	-0,1540	-0,2009	-0,2157
6	-0,1270	-0,1364	-0,1472	-0,1611	-0,1872	-0,1085	-0,1424	-0,1861	-0,1998
7	-0,2369	-0,2459	-0,2597	-0,2815	-0,3277	-0,1911	-0,2524	-0,3317	-0,3583
8	-0,3556	-0,3703	-0,3915	-0,4238	-0,4914	-0,2851	-0,3764	-0,4929	-0,5315
9	-0,5220	-0,5430	-0,5732	-0,6195	-0,7169	-0,4150	-0,5483	-0,7168	-0,7727
10	-0,6338	-0,6636	-0,7031	-0,7602	-0,8776	-0,5062	-0,6681	-0,8709	-0,9371
11	-0,6892	-0,7249	-0,7698	-0,8326	-0,9598	-0,5523	-0,7285	-0,9476	-1,0183
12	-0,7084	-0,7470	-0,7944	-0,8595	-0,9899	-0,5689	-0,7501	-0,9747	-1,0467
13	-1,0842	-1,1243	-1,1839	-1,2771	-1,4761	-0,8535	-1,1285	-1,4745	-1,5897
14	-1,7726	-1,8328	-1,9264	-2,0761	-2,3997	-1,3881	-1,8363	-2,4003	-2,5892
15	-2,0829	-2,1789	-2,3054	-2,4881	-2,8660	-1,6487	-2,1771	-2,8325	-3,0461
16	-2,1183	-2,2308	-2,3688	-2,5588	-2,9422	-1,6875	-2,2262	-2,8894	-3,1016
17	-1,5945	-1,7087	-1,8321	-1,9840	-2,2719	-1,2939	-1,7022	-2,1956	-2,3464
18	-0,6518	-0,7380	-0,8145	-0,8888	-1,0061	-0,5613	-0,7323	-0,9271	-0,9771
19	-0,5578	-0,5954	-0,6377	-0,6912	-0,7942	-0,4544	-0,5979	-0,7738	-0,8286
20	-0,3804	-0,4120	-0,4448	-0,4836	-0,5545	-0,3160	-0,4149	-0,5350	-0,5710
21	-0,3020	-0,3244	-0,3488	-0,3792	-0,4364	-0,2500	-0,3286	-0,4257	-0,4556
22	-0,2814	-0,2995	-0,3206	-0,3483	-0,4020	-0,2313	-0,3044	-0,3958	-0,4246
23	-0,2305	-0,2475	-0,2663	-0,2900	-0,3346	-0,1923	-0,2526	-0,3280	-0,3513
24	-0,2227	-0,2370	-0,2539	-0,2762	-0,3194	-0,1843	-0,2424	-0,3158	-0,3390

Nas Tabelas C.16 à C.20 são apresentados os valores das tensões (S_x , S_y , S_{xy} , S_1 e S_2) nas camadas da seção estudada (Seção A-A' da Figura 6.1) do sistema de revestimento cerâmico, no método de elementos finitos, para o CASO-4 (cerâmica escura e temperatura interna de 25,0°C).

Tabela C.16 – Caso 4: Tensão S_x

Hora	SXn40	SXn278	SXn516	SXn754	SXn992	SXn1230	SXn1468	SXn1706	SXn1944
1	0,066289	0,065852	0,06734	0,071611	0,082782	0,048143	0,094195	0,179007	0,205782
2	0,107047	0,109676	0,11427	0,12209	0,139905	0,08018	0,154834	0,289761	0,330607
3	0,103147	0,107896	0,113731	0,121876	0,138892	0,078865	0,151029	0,279777	0,31751
4	0,096143	0,100823	0,106442	0,114142	0,130057	0,073812	0,141267	0,261528	0,296647
5	0,109386	0,113591	0,11925	0,127656	0,145761	0,083035	0,159479	0,296483	0,337106
6	0,120637	0,125445	0,131801	0,141138	0,161126	0,091755	0,176163	0,327369	0,372113
7	0,02543	0,031483	0,036071	0,039522	0,043522	0,023217	0,041844	0,071705	0,077706
8	-0,087963	-0,086013	-0,087133	-0,09241	-0,107326	-0,062892	-0,12384	-0,237036	-0,273584
9	-0,254631	-0,257476	-0,266211	-0,283953	-0,326737	-0,188525	-0,366223	-0,690173	-0,790108
10	-0,366444	-0,377095	-0,393942	-0,421326	-0,482525	-0,276198	-0,532685	-0,995391	-1,13459
11	-0,420719	-0,436796	-0,458603	-0,491099	-0,561092	-0,319886	-0,614717	-1,14367	-1,30065
12	-0,450111	-0,45756	-0,469509	-0,490374	-0,544336	-0,299915	-0,563777	-1,01443	-1,14948
13	-0,728756	-0,74586	-0,776415	-0,829511	-0,951289	-0,545932	-1,05557	-1,97855	-2,25869
14	-1,24452	-1,27406	-1,32689	-1,41813	-1,6265	-0,933307	-1,80407	-3,38035	-3,85801
15	-1,46828	-1,52259	-1,59763	-1,71064	-1,95518	-1,11533	-2,1444	-3,99237	-4,54186
16	-1,51011	-1,57572	-1,65905	-1,77787	-2,02858	-1,15394	-2,21301	-4,10723	-4,66495
17	-1,11755	-1,18794	-1,26352	-1,35767	-1,5418	-0,869978	-1,6563	-3,04701	-3,44395
18	-0,414298	-0,469124	-0,5157	-0,5585	-0,624732	-0,343271	-0,637247	-1,1355	-1,2616
19	-0,325567	-0,345351	-0,36696	-0,394037	-0,447637	-0,252741	-0,481339	-0,885542	-1,0015
20	-0,14146	-0,157335	-0,171381	-0,185195	-0,208047	-0,115198	-0,215412	-0,387174	-0,432342
21	-0,060656	-0,067659	-0,073704	-0,079639	-0,089318	-0,049353	-0,092175	-0,165297	-0,184264
22	-0,038753	-0,041755	-0,044707	-0,048188	-0,054633	-0,030727	-0,058334	-0,106878	-0,12036
23	0,013426	0,011312	0,010313	0,010591	0,012955	0,008225	0,017263	0,035398	0,042275
24	0,021872	0,022301	0,023167	0,024693	0,02827	0,016194	0,031259	0,05845	0,06678

Tabela C.17 – Caso 4: Tensão S_y

Hora	SYn40	SYn278	SYn516	SYn754	SYn992	SYn1230	SYn1468	SYn1706	SYn1944
1	0,0060	0,0061	0,0067	0,0079	0,0103	0,0116	0,0003	-0,0048	-0,0017
2	0,0098	0,0100	0,0109	0,0128	0,0166	0,0187	-0,0002	-0,0085	-0,0026
3	0,0095	0,0097	0,0105	0,0124	0,0160	0,0180	-0,0007	-0,0086	-0,0025
4	0,0089	0,0090	0,0098	0,0116	0,0150	0,0168	-0,0007	-0,0081	-0,0023
5	0,0101	0,0102	0,0111	0,0131	0,0170	0,0191	-0,0006	-0,0090	-0,0027
6	0,0111	0,0113	0,0123	0,0145	0,0187	0,0210	-0,0006	-0,0099	-0,0029
7	0,0025	0,0026	0,0028	0,0032	0,0041	0,0044	-0,0011	-0,0031	-0,0005
8	-0,0080	-0,0081	-0,0088	-0,0104	-0,0136	-0,0154	-0,0006	0,0061	0,0023
9	-0,0233	-0,0237	-0,0258	-0,0305	-0,0395	-0,0447	-0,0001	0,0194	0,0064
10	-0,0338	-0,0343	-0,0373	-0,0440	-0,0570	-0,0642	0,0011	0,0293	0,0091
11	-0,0389	-0,0395	-0,0429	-0,0506	-0,0654	-0,0736	0,0020	0,0344	0,0103
12	-0,0357	-0,0362	-0,0392	-0,0459	-0,0586	-0,0648	0,0076	0,0365	0,0071
13	-0,0671	-0,0681	-0,0740	-0,0874	-0,1132	-0,1277	0,0013	0,0573	0,0182
14	-0,1146	-0,1164	-0,1265	-0,1493	-0,1934	-0,2181	0,0023	0,0981	0,0311
15	-0,1357	-0,1378	-0,1497	-0,1765	-0,2284	-0,2569	0,0065	0,1198	0,0360
16	-0,1398	-0,1420	-0,1542	-0,1817	-0,2349	-0,2639	0,0087	0,1252	0,0367
17	-0,1041	-0,1057	-0,1147	-0,1350	-0,1741	-0,1950	0,0106	0,0972	0,0266
18	-0,0393	-0,0399	-0,0432	-0,0506	-0,0647	-0,0716	0,0096	0,0421	0,0089
19	-0,0302	-0,0307	-0,0333	-0,0392	-0,0506	-0,0567	0,0030	0,0282	0,0077
20	-0,0133	-0,0135	-0,0147	-0,0172	-0,0221	-0,0245	0,0027	0,0138	0,0031
21	-0,0057	-0,0058	-0,0063	-0,0074	-0,0094	-0,0104	0,0012	0,0060	0,0013
22	-0,0036	-0,0037	-0,0040	-0,0047	-0,0061	-0,0068	0,0005	0,0035	0,0009
23	0,0012	0,0012	0,0013	0,0015	0,0020	0,0024	0,0004	-0,0006	-0,0004
24	0,0020	0,0020	0,0022	0,0026	0,0034	0,0038	-0,0001	-0,0017	-0,0005

Tabela C.18 – Caso 4: Tensão S_{xy}

Hora	SXYn40	SXYn278	SXYn516	SXYn754	SXYn992	SXYn1230	SXYn1468	SXYn1706	SXYn1944
1	-8,27E-05	-0,000249	-0,000586	-0,000949	-0,001236	-0,000536	0,010412	-0,001725	-0,001311
2	-0,000137	-0,000412	-0,000969	-0,001563	-0,002019	-0,000842	0,017207	-0,002874	-0,002501
3	-0,000134	-0,000404	-0,000948	-0,001526	-0,00196	-0,000796	0,016843	-0,002828	-0,002663
4	-0,000126	-0,000377	-0,000886	-0,001426	-0,001832	-0,000743	0,015758	-0,002648	-0,002499
5	-0,000142	-0,000426	-0,001	-0,001611	-0,002073	-0,00085	0,017764	-0,002977	-0,002728
6	-0,000157	-0,00047	-0,001104	-0,001779	-0,002289	-0,000938	0,019625	-0,00329	-0,003022
7	-3,86E-05	-0,000116	-0,000269	-0,000424	-0,000522	-0,000167	0,004789	-0,00083	-0,001197
8	0,000108	0,000326	0,000768	0,001247	0,001631	0,00072	-0,013652	0,002259	0,001579
9	0,000323	0,00097	0,002283	0,003691	0,004787	0,002031	-0,040599	0,006764	0,005523
10	0,000472	0,001416	0,003331	0,005372	0,006936	0,002881	-0,059227	0,009909	0,008691
11	0,000546	0,001638	0,00385	0,006203	0,007988	0,003281	-0,068451	0,011477	0,010422
12	0,000538	0,001613	0,003767	0,005994	0,007551	0,002973	-0,06356	0,010457	0,013655
13	0,000933	0,002804	0,006596	0,010646	0,013765	0,00576	-0,117247	0,019571	0,0168
14	0,001595	0,00479	0,011269	0,018189	0,023516	0,009832	-0,200402	0,03347	0,028752
15	0,001902	0,005712	0,013427	0,021635	0,027873	0,011468	-0,238731	0,040004	0,036152
16	0,001966	0,005904	0,013873	0,022336	0,028725	0,011723	-0,246636	0,041394	0,038319
17	0,001479	0,004438	0,010416	0,016733	0,021411	0,008531	-0,185166	0,031181	0,030866
18	0,000578	0,001734	0,004054	0,006461	0,008125	0,002966	-0,072002	0,012294	0,014767
19	0,00043	0,00129	0,003027	0,004863	0,006225	0,002485	-0,0538	0,009081	0,008912
20	0,000194	0,000583	0,001365	0,00218	0,002755	0,001031	-0,024265	0,004147	0,00469
21	8,34E-05	0,00025	0,000585	0,000934	0,001178	0,000437	-0,010394	0,001778	0,002046
22	5,2E-05	0,000156	0,000366	0,000588	0,00075	0,000293	-0,006532	0,001108	0,001112
23	-1,46E-05	-4,39E-05	-0,000105	-0,000173	-0,000236	-0,000122	0,001853	-0,000292	-4,07E-05
24	-2,78E-05	-8,35E-05	-0,000196	-0,000317	-0,000409	-0,000171	0,003473	-0,000579	-0,000511

Tabela C.19 – Caso 4: Tensão S_1

Hora	S1n40	S1n278	S1n516	S1n754	S1n992	S1n1230	S1n1468	S1n1706	S1n1944
1	0,0979	0,0973	0,0981	0,1006	0,1058	0,0559	0,0953	0,1790	0,2058
2	0,1600	0,1623	0,1658	0,1707	0,1787	0,0936	0,1567	0,2898	0,3306
3	0,1553	0,1598	0,1645	0,1699	0,1773	0,0924	0,1529	0,2798	0,3175
4	0,1450	0,1494	0,1540	0,1591	0,1660	0,0865	0,1430	0,2616	0,2967
5	0,1643	0,1682	0,1727	0,1781	0,1861	0,0972	0,1614	0,2965	0,3371
6	0,1813	0,1857	0,1908	0,1969	0,2057	0,1074	0,1783	0,3274	0,3721
7	0,0410	0,0470	0,0513	0,0540	0,0554	0,0278	0,0424	0,0717	0,0777
8	-0,0080	-0,0081	-0,0088	-0,0104	-0,0136	-0,0154	0,0009	0,0061	0,0023
9	-0,0233	-0,0237	-0,0258	-0,0304	-0,0394	-0,0446	0,0043	0,0195	0,0065
10	-0,0338	-0,0343	-0,0373	-0,0439	-0,0568	-0,0641	0,0076	0,0294	0,0091
11	-0,0389	-0,0395	-0,0429	-0,0505	-0,0653	-0,0735	0,0095	0,0345	0,0104
12	-0,0357	-0,0362	-0,0392	-0,0458	-0,0585	-0,0648	0,0146	0,0366	0,0072
13	-0,0671	-0,0681	-0,0740	-0,0872	-0,1130	-0,1276	0,0141	0,0575	0,0183
14	-0,1146	-0,1164	-0,1264	-0,1490	-0,1931	-0,2180	0,0243	0,0984	0,0313
15	-0,1357	-0,1378	-0,1496	-0,1762	-0,2279	-0,2567	0,0327	0,1202	0,0363
16	-0,1398	-0,1420	-0,1540	-0,1814	-0,2344	-0,2638	0,0357	0,1256	0,0370
17	-0,1041	-0,1057	-0,1146	-0,1348	-0,1738	-0,1949	0,0310	0,0976	0,0268
18	-0,0393	-0,0399	-0,0431	-0,0505	-0,0646	-0,0716	0,0175	0,0422	0,0091
19	-0,0302	-0,0307	-0,0333	-0,0392	-0,0505	-0,0566	0,0089	0,0283	0,0078
20	-0,0133	-0,0135	-0,0147	-0,0172	-0,0220	-0,0245	0,0054	0,0138	0,0032
21	-0,0057	-0,0058	-0,0063	-0,0073	-0,0094	-0,0104	0,0024	0,0060	0,0013
22	-0,0036	-0,0037	-0,0040	-0,0047	-0,0061	-0,0068	0,0012	0,0035	0,0009
23	0,0187	0,0166	0,0154	0,0154	0,0166	0,0093	0,0175	0,0354	0,0423
24	0,0326	0,0330	0,0336	0,0346	0,0361	0,0189	0,0316	0,0585	0,0668

Tabela C.20 – Caso 4: Tensão S₂

Hora	S2n40	S2n278	S2n516	S2n754	S2n992	S2n1230	S2n1468	S2n1706	S2n1944
1	0,0663	0,0659	0,0673	0,0716	0,0828	0,0482	0,0642	0,0845	0,0918
2	0,1070	0,1097	0,1143	0,1221	0,1399	0,0802	0,1064	0,1383	0,1490
3	0,1031	0,1079	0,1137	0,1219	0,1389	0,0789	0,1043	0,1345	0,1441
4	0,0961	0,1008	0,1065	0,1142	0,1301	0,0738	0,0976	0,1257	0,1346
5	0,1094	0,1136	0,1193	0,1277	0,1458	0,0830	0,1100	0,1421	0,1526
6	0,1206	0,1254	0,1318	0,1412	0,1612	0,0918	0,1215	0,1570	0,1685
7	0,0254	0,0315	0,0361	0,0395	0,0435	0,0232	0,0300	0,0364	0,0373
8	-0,0880	-0,0860	-0,0871	-0,0924	-0,1074	-0,0629	-0,0841	-0,1113	-0,1214
9	-0,2546	-0,2575	-0,2662	-0,2840	-0,3268	-0,1886	-0,2507	-0,3276	-0,3543
10	-0,3664	-0,3771	-0,3940	-0,4214	-0,4826	-0,2762	-0,3663	-0,4753	-0,5117
11	-0,4207	-0,4368	-0,4586	-0,4912	-0,5612	-0,3199	-0,4236	-0,5478	-0,5883
12	-0,4501	-0,4576	-0,4695	-0,4905	-0,5445	-0,3000	-0,4009	-0,5062	-0,5402
13	-0,7288	-0,7459	-0,7765	-0,8297	-0,9515	-0,5460	-0,7248	-0,9428	-1,0166
14	-1,2445	-1,2741	-1,3270	-1,4184	-1,6269	-0,9334	-1,2388	-1,6110	-1,7366
15	-1,4683	-1,5226	-1,5978	-1,7109	-1,9556	-1,1155	-1,4773	-1,9113	-2,0534
16	-1,5101	-1,5758	-1,6592	-1,7782	-2,0290	-1,1541	-1,5270	-1,9708	-2,1136
17	-1,1176	-1,1880	-1,2636	-1,3579	-1,5421	-0,8701	-1,1479	-1,4714	-1,5700
18	-0,4143	-0,4691	-0,5157	-0,5586	-0,6249	-0,3433	-0,4485	-0,5612	-0,5884
19	-0,3256	-0,3454	-0,3670	-0,3941	-0,4477	-0,2528	-0,3336	-0,4276	-0,4565
20	-0,1415	-0,1573	-0,1714	-0,1852	-0,2081	-0,1152	-0,1509	-0,1901	-0,2003
21	-0,0607	-0,0677	-0,0737	-0,0797	-0,0893	-0,0494	-0,0647	-0,0813	-0,0856
22	-0,0388	-0,0418	-0,0447	-0,0482	-0,0546	-0,0307	-0,0405	-0,0517	-0,0550
23	0,0134	0,0113	0,0103	0,0106	0,0130	0,0082	0,0113	0,0158	0,0180
24	0,0219	0,0223	0,0232	0,0247	0,0283	0,0162	0,0215	0,0279	0,0301