

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

**ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS TENSÕES
ATUANTES NA ARGAMASSA COLANTE DE FACHADAS DE
EDIFICAÇÕES SOB AÇÃO DA FADIGA TERMO-MECÂNICA.**

YINA FERNANDA MUÑOZ MOSCOSO

**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 ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

APROVADA POR:

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

**Prof. Márcio Augusto Roma Buzar, Dsc. (FAU-UnB)
(Examinador Interno)**

**Profa. Elisandra Nazaré Maia de Medeiros, Dsc. (IFB)
(Examinador Externo)**

**Publicação E. DM – 008 A/13
BRASÍLIA/DF, 27 DE MAIO DE 2013**

MOSCOSO, YINA FERNANDA MUÑOZ

Estudo Numérico e Experimental das Tensões Atuantes na Argamassa Colante de Fachadas de Edificações sob ação da Fadiga Termo-mecânica. [Distrito Federal] 2013. xix, 142p, 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2013).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Choque térmico

2. Sistema de Revestimento

3. Fadiga

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MOSCOSO Y. F. M. (2013). Estudo Numérico e Experimental das Tensões Atuantes na Argamassa Colante de Fachadas de Edificações sob ação da Fadiga Termo-mecânica. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E. DM – 008 A/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 142p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Yina Fernanda Muñoz Moscoso.

TÍTULO: Estudo Numérico e Experimental das Tensões Atuantes na Argamassa Colante de Fachadas de Edificações sob ação da Fadiga Termo-mecânica.

GRAU: Mestre

ANO: 2013

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.

Yina Fernanda Muñoz Moscoso
SQN 406, Bloco A, Apto 106
70847010 Brasília – DF – Brasil.

*A Deus por me brindar tudo o necessário sempre.
Meus pais por serem minha força e minha rocha em cada momento.
Meus irmãos por acreditar em mim e me apoiar.
Meus amigos por serem como uma família.
Muito Obrigada por ser parte da minha vida e deste projeto.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me ajudar em cada etapa da construção desta pesquisa e em todos os momentos da minha vida.

A minha Família, pelo apoio de sempre, por ser minha rocha para cada um dos meus passos, por estar presentes mesmos que as distâncias entre nós sejam enormes, pelo amor, compressão e palavras certas. Amo vocês.

Ao professor Luciano Mendes Bezerra, quero agradecer enormemente pela confiança depositada em mim, por compartilhar seus conhecimentos, pela orientação, por me incentivar, pelas sugestões e pela participação nesta pesquisa.

A toda a equipe do PECC, professores, funcionários, que contribuíram no desenvolvimento desta pesquisa, especialmente a João Carlos Uchôa e Anderson Silva Barbosa, pela disponibilidade, companheirismo, e por compartilhar os conhecimentos para chegar aos resultados deste trabalho.

Aos meus colegas do mestrado, pelo companheirismo durante todo este tempo, pelo apoio, compressão, diversão, risos, palavras, por serem amigos mais do que colegas de estudo e de profissão.

A meus amigos pelo apoio, compressão, pelos momentos compartilhados, de alegrias e tristezas, por serem minha família aqui no Brasil durante estes dois anos o qual foi essencial para a culminação deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DAS TENSÕES ATUANTES NA ARGAMASSA COLANTE DE FACHADAS DE EDIFICAÇÕES SOB AÇÃO DA FADIGA TERMO-MECÂNICA.

Autor: Yina Fernanda Muñoz Moscoso

Orientador: Luciano Mendes Bezerra

Programa de Pós - graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Maio de 2013.

O sistema de revestimento em fachadas vem alcançando grande escala de utilização no Brasil devido às vantagens no seu uso, como, proteger os elementos estruturais, isolamento térmico, segurança ao fogo, estanqueidade, regularização da superfície, entre outras vantagens. O clima, a localização e outros fatores atuantes na obra civil, fazem com que se apresentem manifestações patológicas no sistema de revestimento, devido principalmente ao choque térmico, já que a exposição à variação térmica cria gradientes internos de temperatura e estes gradientes por sua vez provocam tensões térmicas que podem causar trincas e possivelmente a falha do sistema de revestimento, sendo as tensões e deformações de origem termo-mecânica as consideradas nesta pesquisa, posto que elas geram o deslocamento do revestimento cerâmico. Como este sistema de revestimento cerâmico que é composto por diferentes materiais, faz-se necessário se manter um equilíbrio entre as tensões atuantes no sistema e tensões resistentes para ter-se uma integridade da fachada. Este trabalho procura avaliar o comportamento da argamassa colante quando sob fadiga, traçando para isso a curva experimental de Wöhler ou curva S-N. As tensões térmicas alternadas que agem no sistema podem provocar a ruptura por fadiga. Desta forma, os limites de resistência à fadiga tanto à compressão quanto à tração são importantes valores para serem conhecidos. Tais valores foram obtidos neste trabalho e valem, respectivamente, 5,06 MPa e 1,69 MPa. Conclui-se ainda que a argamassa colante, dentro do sistema de revestimento e nos transientes térmicos aqui estudados, não apresenta risco de ruptura por fadiga termo-mecânica.

Palavras chave: Revestimento à Fadiga, Sistema de Revestimento, Tensão em fachadas.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF STRESS ACTING THE MORTAR OF CERAMIC FAÇADE AND FATIGUE DUE TO THERMAL-MECHANICAL ACTION.

Autor: Yina Fernanda Muñoz Moscoso

Orientador: Luciano Mendes Bezerra

Programa de Pós - graduação em Estruturas e Construção Civil

Brasília, Maio de 2013.

Ceramic facade coating system is mostly use in Brazil. It protects the structural elements supporting the building, provides thermal insulation, fire protection, tightness, surface adjustment, among other advantages. However, the weather variation may be a source of some pathological manifestations in facade coating systems due to change in the weather temperature conditions. In tropical countries, rainstorms are very common and induce thermal shocks on ceramic facades. The exposure to thermal shocks creates in the facade internal temperature gradients and such gradients generate thermal stresses that can create cracks and progressively cause the failure of large pieces of the ceramic coating system. Such thermal stresses and strains may generate the peeling of the ceramic coating system and may bring danger to people on the sidewalk of the building. To keep the integrity of the ceramic facade, different materials composing the ceramic coating system must maintain the equilibrium between the stresses acting on the coating system and the materials strength. This study searches to evaluate the fatigue behavior of mortar. For this, the experimental Wöhler S-N curve is obtained. The alternating thermal stresses on the system may produce fatigue failure; therefore, the fatigue strength limits in compression and in tension are important parameters to be known. These values were obtained in this work and are, respectively, 5.06 MPa and 1.69 MPa. In conclusion, the mortar within the coating system and under the thermal transients studied here shows no fatigue failure risk.

Keywords: Fatigue coating, Coating system, Stress facades

INDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 MOTIVAÇÃO	2
1.3 OBJETIVO	3
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 FUNÇÕES E PROPRIEDADES DOS SISTEMAS DE REVESTIMENTOS	5
2.2 DESCRIÇÕES DO SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO	6
2.2.1 - Base	7
2.2.2 - Chapisco.....	7
2.2.3 - Emboço	8
2.2.4 - Argamassa Colante	8
2.2.5 - Cerâmica.....	13
2.2.6 - Rejunte.....	14
2.3 ESTUDOS SOBRE TENSÕES E FADIGA EM REVESTIMENTOS.....	15
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	18
3.1 PRINCÍPIOS DA MECÂNICA DA FRATURA	18
3.2 CARACTERIZAÇÃO PRÁTICA DA FADIGA- CURVA S-N	21
3.3 TEORIA DE ACUMULAÇÃO DE DANOS.....	23
3.4 EFEITOS DO CHOQUE TÉRMICO NO REVESTIMENTO	24
3.4.1 - Troca de Calor em Fachadas	29
3.5 FADIGA EM SISTEMAS DE REVESTIMENTO	34
3.5.1 - Fundamentos das tensões térmicas.	34
3.5.2 - O efeito da temperatura sobre os revestimentos.....	36
3.5.3 - Teoria de Coulomb-Mohr	39
4. ESTUDO EXPERIMENTAL	42
4.1 INTRODUÇÃO	42
4.2 ENSAIOS ESTÁTICOS NA ARGAMASSA	42
4.2.1 - Propriedades e características da argamassa.....	43

4.2.1.1 - Determinação da Consistência à deformação da Argamassa através do Cone de Penetração	43
4.2.1.2 - Confeção dos Corpos de prova	45
4.2.1.3 - Determinação da Resistência à Tração na Flexão.....	45
4.2.1.4 - Determinação da Resistência à Compressão	47
4.2.1.5 - Ensaio para determinação do módulo de deformação.....	49
4.3 ENSAIOS À FADIGA NA ARGAMASSA.....	50
4.3.1 - Equipamento usado	50
4.3.2 - Dimensionamento do Corpo-de-prova.....	51
4.4 CURVAS S-N PARA A ARGAMASSA COLANTE	55
5. ESTUDO NUMÉRICO	60
5.1 INTRODUÇÃO	60
5.2 MODELO NUMÉRICO	60
5.2.1 - Análise das tensões na Argamassa Colante	63
5.2.2 - Modelo de Fachada para a Análise Térmica.....	67
5.2.3 - Condições de Contorno para o modelo como fachada	69
5.2.4 - Cálculo da Fachada Equivalente.....	69
5.2.4.1 - Módulo de Elasticidade Equivalente	70
5.2.4.2 - Coeficiente de Dilatação Térmica Equivalente.....	73
6. ANÁLISE DO CHOQUE TÉRMICO, TÉRMO-MECÂNICO E DE FADIGA.	76
6.1 ANÁLISE DO CHOQUE TÉRMICO	76
6.2 ANÁLISE TERMO-MECÂNICA	87
6.2.1 - Tensões Principais pela Fadiga no Sistema de Revestimento devido ao Choque Térmico	88
6.2.2.1 - Sistema de Revestimento com Cerâmica Clara:.....	88
6.2.2.2 - Sistema de Revestimento com Cerâmica Escura:	95
6.3 ANÁLISE DE FADIGA.....	102
6.3.1 - Análise de Fadiga do corpo de prova à compressão - Argamassa Colante	102
6.3.2 - Análise de Fadiga na Argamassa Colante do Sistema de Revestimento.....	103
6.3.2.1 - Análise de Fadiga na Cerâmica Clara.....	103
6.3.2.2 - Análise de Fadiga na Cerâmica Escura	105

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	107
7.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL	107
7.2 ANÁLISE NUMERICA.....	108
7.3 ANÁLISE A FADIGA.....	109
7.4 TRABALHOS FUTUROS.....	110
REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA.....	111
APÊNDICE B.....	116
APENDICE C	118
APÊNDICE D	120
APENDICE E.....	122

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

σ_a	amplitude do carregamento
F_c	carga máxima aplicada, em N;
F_f	carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em Newtons;
h_e	coeficiente de condutância térmica superficial externa ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$);
h_i	coeficiente de condutância térmica superficial interna ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$);
λ	coeficiente de condutância térmica ($W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$).
P	coeficiente vertical de tração
α	coeficiente de absorção da superfície da parede diante da radiação solar;
He	condutância superficial exterior da parede em $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$
K	coeficiente de condutividade interna do material ($Kcal/m\text{ }^\circ\text{C}\cdot h$);
α	coeficiente de dilatação térmica;
α_L	coeficiente de dilatação térmica linear do revestimento
α_A	coeficiente de dilatação térmica linear da argamassa
d	comprimento inicial.
Δt	diferença potencial térmico ($^\circ\text{C}$);
L	distância entre os suportes, em milímetros.
ΔI_L	diferença entre a radiação de onda longa emitida pela superfície em W/m^2 .
ϵ	emissividade da superfície;
σ_1	esforço principal máximo,

σ_3	esforço principal mínimo,
σ_2	esforço intermédio e é considerado igual a σ_3 ,
N	esforço normal
L	espessura da camada (m);
Q	fluxo térmico (Kcal/h);
E	módulo de elasticidade do material;
E_A	módulo de elasticidade da argamassa
E_L	módulo de elasticidade do revestimento
η_i	número de ciclos que consome uma fração de vida
N_i	número de ciclos a rotura num ensaio de amplitude constante
I_g	radiação solar global incidente na superfície em W/m^2
R_t	resistência térmica ($^{\circ}C/Kcal/h$);
R_f	resistência à tração na flexão (MPa)
R_c	resistência à compressão, em MPa;
q	resistência de aderência
r_i	relação de ciclos (Teoria de acumulação de danos)
R	razão entre a tensão mínima e máxima
S_A	seção da argamassa
S	seção transversal da barra de material homogêneo.
S_L	seção do revestimento
S	superfície através da qual se dá a passagem de calor (m^2)

T	temperatura ambiente
T ₁	temperatura acima da temperatura ambiente
T ₂	temperatura abaixo da temperatura ambiente
T _e	temperatura externa do ambiente (°C)
T _i	temperatura interna do ambiente (°C)
t _e	temperatura externa do revestimento (°C)
t _i	temperatura interna do revestimento (°C)
t _q	temperatura equivalente em °C
T _e	temperatura do ar em °C
σ _{Rf}	tensão média
S _x	tensões na direção “x”, na horizontal do plano
S _y	tensões na direção “y”, na vertical do plano
S _{xy}	tensões na direção “xy”, na vertical do plano
Δσ,σ	variação de tensão
Δt	variação da temperatura= (T ₂ -T ₁)
Δd	variação do comprimento “d”
ANSYS	analysis System (Software)
ABNT	associação brasileira de normas técnicas
INMET	instituto meteorológico de Brasília
MFE	método de elementos finitos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Deslocamento de Revestimento Cerâmico (https://www.google.com.br/searchBdeslocamento...).....	2
Figura 2.1 Estrutura de sistema de revestimento.....	6
Figura 2.2 Fachadas de revestimento cerâmico https://www.google.com.br/search/fachadas+de+casas...	13
Figura 3.1 Modos básicos de carregamentos em uma trinca.....	18
Figura 3.2 Coordenadas na frente da trinca (MECÂNICA DA FRATURA-FADIGA).....	19
Figura 3.3 Desenvolvimento do processo de fadiga (BROEK, 1988).	20
Figura 3.4 Curva S-N qualitativa.....	22
Figura 3.5 Variação de tensão em função do tempo.	22
Figura 3.6 Uso do modelo Palmgreen-Miner para a predição de vida com uma amplitude de carga variável (HENY e VERA, 2007)	24
Figura 3.7 Sistema de revestimento na temperatura ambiente (T).....	25
Figura 3.8 Sistema de Revestimento sujeito a cisalhamento simples.....	26
Figura 3.9 Sistema de revestimento sujeito à tensão de tração ($T_2 < T$).....	26
Figura 3.10 Revestimento solicitado à compressão por tração.	27
Figura 3.11 Representação das forças “p” e “q” atuando no revestimento cerâmico.	27
Figura 3.12 Sistema de revestimento entrando em colapso, $q \leq p$	28
Figura 3.13 Colapso do sistema de revestimento.	28
Figura 3.14 Diferentes ações no sistema de revestimento.....	30
Figura 3.15 Troca de calor através de paredes.	30

Figura 3.16 Temperaturas internas nas interfaces do revestimento.....	32
Figura 3.17 Barra sujeita a um efeito térmico (FIORITO, 1994).....	35
Figura 3.18 Variação da temperatura.	37
Figura 3.19 Representação gráfica do Circulo de Mohr, (PORTILLO, 2008).....	39
Figura 3.20 Círculo de Mohr para Tração e Compressão (CHAGAS, 2009)	40
Figura 3.21 Representação gráfica da teoria de Coulomb-Mohr para estado de tensão biaxial. (CHAGAS, 2009).	41
Figura 4.1 Argamassa utilizada nos ensaios.....	43
Figura 4.2 Ensaio de penetração de cone.	44
Figura 4.3 Corpos de prova para o ensaio de resistência a compressão.....	45
Figura 4.4 Diagrama de carga para determinação da resistência à tração na flexão.	46
Figura 4.5 Equipamento e Corpo de Prova.....	46
Figura 4.6 Corpo-de-prova rompido à tração na flexão utilizado no ensaio à compressão.	48
Figura 4.7 Diagrama carga versus deformação, característico de ensaio de um corpodeprova para a determinação do módulo de deformação da argamassa.....	49
Figura 4.8 Equipamento MTS 810 Material Test System.	51
Figura 4.9 Mistura da argamassa.....	52
Figura 4.10 Pano úmido, para evitar a perda da agua.....	52
Figura 4.11 Mecanismo de apoio para o ensaio de corpos-de-prova cilíndricos, submetidos à fadiga sob compressão.	52
Figura 4.12 Corpos de Prova da argamassa colante para o ensaio de fadiga a compressão.....	53
Figura 4.13 (a) Ensaio de Fadiga a Compressão, (b) Corpos de prova ensaiados a Fadiga a compressão com ruptura longitudinal na parte central.....	54

Figura 4.14 Ruptura à compressão de concretos de baixa ou média resistência $f_{ck} < 40$ Mpa. (Tecnologia do Concreto Estrutural).	54
Figura 4.15 Corpos de prova fraturados.	55
Figura 4.16 Curva S-N de Fadiga.	57
Figura 4.17 Curva S-N linearizada	58
Figura 4.18 Curvas de ruptura para avaliação da fadiga.	59
Figura 5.1 Hipótese simplificadora de estado plano.....	61
Figura 5.2 Dimensões típicas e adotadas no modelo do sistema de revestimento em cm.	61
Figura 5.3 Geometria do elemento SOLID65 do ANSYS.	62
Figura 5.4 Geometria do elemento PLANE55 e PLANE 42 do ANSYS.	62
Figura 5.5 Discretização do corpo de prova utilizado no ensaio a fadiga a compressão.	64
Figura 5.6 Aplicação de cargas e engaste do modelo.....	65
Figura 5.7 Modelo numérico em elementos finitos para análise térmica.	67
Figura 5.8 Modelo numérico em elementos finitos para análise termomecânica	67
Figura 5.9 Elementos finitos que simulam os componentes de uma fachada.	68
Figura 5.10 Modelo com fachada equivalente de 5 cm em cada lado.....	69
Figura 6.1 Temperaturas do sistema de Revestimento a serem calculadas no programa ANSYS	79
Figura 6.2 Choque térmico aos 0,001seg, Cerâmica Clara.	79
Figura 6.3 Choque térmico aos 1800seg, Cerâmica Clara.	80
Figura 6.4 Choque térmico aos 3600seg, Cerâmica Clara.	80
Figura 6.5 Choque térmico aos 5400seg, Cerâmica Clara.	80

Figura 6.6 Choque térmico aos 7200seg, Cerâmica Clara.	81
Figura 6.7 Choque térmico aos 0,001seg, Cerâmica Escura.	81
Figura 6.8 Choque térmico aos 1800seg, Cerâmica Escura.	82
Figura 6.9 Choque térmico aos 3600seg, Cerâmica Escura.	82
Figura 6.10 Choque térmico aos 5400seg, Cerâmica Escura.	82
Figura 6.11 Choque térmico aos 7200seg, Cerâmica Escura.	83
Figura 6.12 Distribuição de Temperatura para as interfaces do sistema de revestimento para Cerâmica Clara.	84
Figura 6.13 Distribuição de Temperatura para as interfaces do sistema de revestimento para Cerâmica Escura.	85
Figura 6.14 Corte A-A' e Corte B-B' a serem estudados.	87
Figura 6.15 (a) Nodos do Corte A-A' , (b) Corte B-B' com a numeração dos nodos a serem estudados.	88
Figura 6.16 Tensões S_x (MPa) - Corte A-A'- Cerâmica Clara.	89
Figura 6.17 Tensões S_x (MPa) - Corte B-B'- Cerâmica Clara.	91
Figura 6.18 Tensões S_y (MPa) - Corte A-A'- Cerâmica Clara.	92
Figura 6.19 Tensões S_y (MPa) - Corte B-B'- Cerâmica Clara.	92
Figura 6.20 Tensões S_{xy} (MPa) - Corte A-A'- Cerâmica Clara.	94
Figura 6.21 Tensões S_{xy} (MPa) - Corte B-B'- Cerâmica Clara.	95
Figura 6.22 Tensões S_x (MPa) - Corte A-A'- Cerâmica Escura.	96
Figura 6.23 Tensões S_x (MPa) - Corte B-B'- Cerâmica Escura.	97
Figura 6.24 Tensões S_y (MPa) - Corte A-A'- Cerâmica Escura.	98
Figura 6.25 Tensões S_y (MPa) - Corte B-B'- Cerâmica Escura.	99

Figura 6.26 Tensões S_{xy} (MPa) - Corte A-A'- Cerâmica Escura.....	100
Figura 6.27 Tensões S_{xy} (MPa) - Corte B-B'- Cerâmica Escura.	101
Figura 6.28 Tensões atuantes no Sistema de Revestimento na direção “x” na primeira meia hora.	101
Figura 6.29 Tensões atuantes no Sistema de Revestimento na direção “y” na primeira meia hora.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Consistência da argamassa colante	44
Tabela 4.2 Resistência da argamassa à tração na flexão	47
Tabela 4.3 Resistência a compressão	48
Tabela 4.4 Modulo de deformação a flexão ACII.....	50
Tabela 4.5 Resistência a fadiga a compressão.....	56
Tabela 4.6 Pontos de ensaio de fadiga da argamassa colantes sob compressão e sob tração...	57
Tabela 5.1 Resumo de entrada para o elemento SOLID65.	62
Tabela 5.2 Resumo de entrada para o elemento PLANE55.	63
Tabela 5.3 Resumo de entrada para o elemento PLANE42	63
Tabela 5.4 Propriedades atribuídas ao elemento SOLID65.	64
Tabela 5.5 Dados usados para a modelagem.	65
Tabela 5.6 Tensões obtidas no corpo de prova modelado a compressão.	65
Tabela 5.7 Medias das tensões atuantes nos nós	66
Tabela 5.8 Propriedades atribuídas ao elemento PLANE55.	68
Tabela 5.9 Propriedades atribuídas ao elemento PLANE42.	68
Tabela 5.10 Módulo de elasticidade equivalente	73
Tabela 5.11 Coeficientes de dilatação térmica linear	75
Tabela 6.1 Valores de radiação solar incidente (I _g).	77
Tabela 6.2 Coeficiente de absorção térmica	77
Tabela 6.3 Variação da condutância térmica superficial externa (h _e).....	77

Tabela 6.4 Coeficiente de condutibilidade térmica usada no programa Ansys.....	78
Tabela 6.5 Temperaturas nas interfaces das camadas para cerâmica clara	83
Tabela 6.6 Temperaturas nas interfaces das camadas para cerâmica escura.....	84
Tabela 6.7 Análise a fadiga a compressão para a carga 1	102
Tabela 6.8 Análise a fadiga a compressão para a carga 2	102
Tabela 6.9 Análise a fadiga a compressão para a carga 3	102

1. INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

A compatibilização de todos os componentes do sistema de revestimento de fachada, tais como chapisco, emboço, telas de reforço, argamassa colante e de rejunte, materiais de juntas e a própria cerâmica em condições reais aplicadas, sobre camadas deformáveis além da alvenaria convencional, são de grande importância dentro de qualquer projeto de construção civil. As cerâmicas protegem os elementos estruturais, garantem isolamento térmico, segurança ao fogo, estanqueidade, regularização de superfície, acabamento estético, entre outros fatores.

O clima, a localização e outros fatores atuantes na obra civil, devem ser avaliados e se possível, quantificados para que se possam determinar as diferentes solicitações a serem impostas no edifício e desta forma, se escolher a argamassa adequada para ser utilizada na construção.

Devido à complexidade dos efeitos ambientais sobre as estruturas e sua conseqüente resposta, uma melhora no desempenho da edificação vai depender das características dos materiais utilizados, como também da técnica de execução, da melhora dos projetos, tanto estruturais como arquitetônicos, e ainda mais da manutenção e fiscalização que tem que ser feita durante a execução do projeto.

Os revestimentos externos são afetados pelo fenômeno da movimentação higroscópica que ocorre quando há circulação de água ou da umidade no interior dos materiais resultante de diversos mecanismos de transporte. Tais revestimentos exigem compensação na resistência de aderência da argamassa colante, menor rigidez da argamassa de rejuntamento e compatibilidade do emboço de substrato. Segundo FIORITO (1994), todas as camadas de suporte do revestimento têm deformações próprias devido a sua secagem diferencial, além disso, certos materiais, como o cerâmico não são totalmente estáveis, uma vez que se expandem em menor ou maior grau de deformação em função da umidade natural do ambiente.

O aumento progressivo dos esforços pode atingir um estado de tensão que provoque o rompimento ou desagregação das peças de revestimento com a camada de suporte. A Figura 1.1 apresenta um exemplo de deslocamento das placas cerâmicas, provocado pelo elevado nível de tensão na placa.



Figura 1.1 Deslocamento de Revestimento Cerâmico(<https://www.google.com.br/fachadas+de+casa>)

1.2 MOTIVAÇÃO

A motivação para fazer esta pesquisa surge da importância que tem o estudo do deslocamento das placas cerâmicas no revestimento de fachadas, o qual pode causar acidentes sobre transeuntes e veículos até chegar ocasionar o óbito. Já que devido às diversas interações entre elas ao choque térmico, as cerâmicas se desprendem e, levando-se em conta que a ligação entre argamassa colante e o elemento cerâmico é de grande importância na resposta da estrutura às tensões cíclicas de temperatura, o tema aqui abordado aparece como de grande interesse na engenharia civil. Além disso, esta pesquisa deseja dar continuidade e ampliar os estudos feitos nos trabalhos iniciais desenvolvidos por SARAIVA (1998), SILVA (2000), UCHÔA (2007) e CHAGAS (2009). Nota-se ainda que os problemas no sistema de revestimento cerâmico são decorrentes, sobretudo, da ação de tensões cíclicas e conseqüentemente ruptura por fadiga de parte do sistema de revestimento.

Também se pretende com esta pesquisa abrir novas perspectivas da interpretação sobre as patologias comumente encontradas nas fachadas com cerâmicas, fornecendo para isso uma metodologia quantitativa para se avaliar a vida útil do sistema de revestimento cerâmico.

Os estudos de SARAIVA (1998), SILVA (2000), UCHÔA (2007) e CHAGAS (2009), trabalhos pioneiros na UnB nesta linha de pesquisa, analisaram o emboço no sistema de revestimento, sendo que o presente trabalho desenvolve um estudo focado na argamassa colante, diferentemente dos trabalhos citados. Portanto, através desta pesquisa e das respectivas publicações produzidas (MOSCOSO *et al.*, 2013a e 2013b), se espera contribuir para um maior conhecimento dentro do complexo de materiais e tensões que existem no sistema de revestimento.

1.3 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento do sistema de revestimento de fachadas por meio de um estudo experimental e numérico das tensões cíclicas à compressão e tração advindas do choque térmico e como estas tensões influenciam no fenômeno da fadiga da argamassa colante. Para alcançar este objetivo geral, temos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar as tensões no sistema de revestimento em fachadas, especificamente atuante na argamassa colante, usando um modelo numérico computacional em elementos finitos a fim de se obter as tensões e deformações atuantes no sistema de revestimento provenientes do choque térmico.
- Analisar os danos do efeito de fadiga sobre o sistema de revestimento, especificamente na argamassa colante.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de dissertação está organizado em sete capítulos. No primeiro capítulo aborda-se a importância do tema, a complexidade do assunto a ser tratado na dissertação, a motivação e os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo são apresentados os principais trabalhos e pesquisas 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. Apresenta-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 Colante que é usada neste trabalho, bem como, a metodologia para o ensaio à fadiga dessa argamassa, visando à obtenção da Curva S-N.

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 e tensões de cisalhamento do modelo numérico referente ao sistema de revestimento estudado. Neste capítulo também são analisados os resultados de fadiga proveniente do choque térmico.

O sétimo capítulo cita as principais conclusões e evidências constatadas neste trabalho e apresenta sugestões para futuras pesquisas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre as funções e propriedades dos sistemas de revestimento, mostrando a composição típica e os aspectos gerais dos materiais que compõem o sistema de revestimento cerâmico, enfaticamente a argamassa colante, assim como também os estudos realizados sobre tensões e fadiga em sistemas de revestimento de fachadas.

2.1 FUNÇÕES E PROPRIEDADES DOS SISTEMAS DE REVESTIMENTOS

O revestimento externo das fachadas é o recobrimento de uma superfície lisa ou áspera com uma ou mais camadas superpostas de argamassa apta a receber, sem danos, um acabamento final em pintura ou cerâmica, entre outras. A eficiência do sistema de revestimento depende, entre outros fatores, da qualidade da peça cerâmica empregada e também da argamassa colante utilizada. Essa argamassa deve ter boa resistência mecânica, impermeabilidade, aderência, durabilidade e volume constante. Na escolha da argamassa, essas qualidades são valorizadas de acordo com as exigências da obra, devido as argamassas serem materiais de construção que tem na sua constituição aglomerante, agregado mineral a água e, quando recém-misturadas, possuem boa plasticidade. Quanto endurecidas as argamassas tornam-se rígidas e com maior resistência e aderência.

Os aspectos climáticos atuantes nos sistema de revestimento das fachadas são um dos principais fatores que influenciam na degradação de tais sistemas, já que a exposição à variação térmica gera gradientes internos de temperatura. Por sua vez, estes gradientes provocam tensões térmicas que podem causar trincas e possivelmente falhas da peça. Nota-se ainda que as variações de temperatura em conjunto com as variações de umidade podem provocar esforços que, associados a outros fatores, podem levar à ruptura dos sistemas de revestimentos cerâmicos. Considerando um trecho do sistema de revestimento, o aumento da temperatura gera tensões de cisalhamento na interface cerâmica/argamassa colante e tensões de tração ou de compressão nas extremidades deste trecho do sistema de revestimento. Tendo-se, portanto, um aumento e diminuição da temperatura sobre as peças cerâmicas, estas tendem a se desprender da base, ocasionando o processo de descolamento

(FIORITO, 1994), freqüentemente observado nas construções. Como mostrado na Figura 1.1.

O aparecimento das fissuras nas argamassas ocorre sempre que a deformação à tração ou compressão ao qual esta submetida exceda a respectiva resistência. A capacidade de deformação da argamassa varia com a idade e velocidade de aplicação da deformação, tendo vários mecanismos básicos que podem originar as deformações, como são os movimentos gerados no interior da argamassa, por exemplo, a retração de secagem, expansão ou contração térmica, deformação plástica entre outras. Também as condições externas impostas, provenientes da própria estrutura, tais como os recalques diferenciais que geram deformação.

2.2 DESCRIÇÕES DO SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO

As camadas do sistema de revestimento são distribuídas em base, chapisco, argamassa de assentamento, pasta de cimento ou argamassa colante e revestimento cerâmico como mostrado na Figura 2.1.

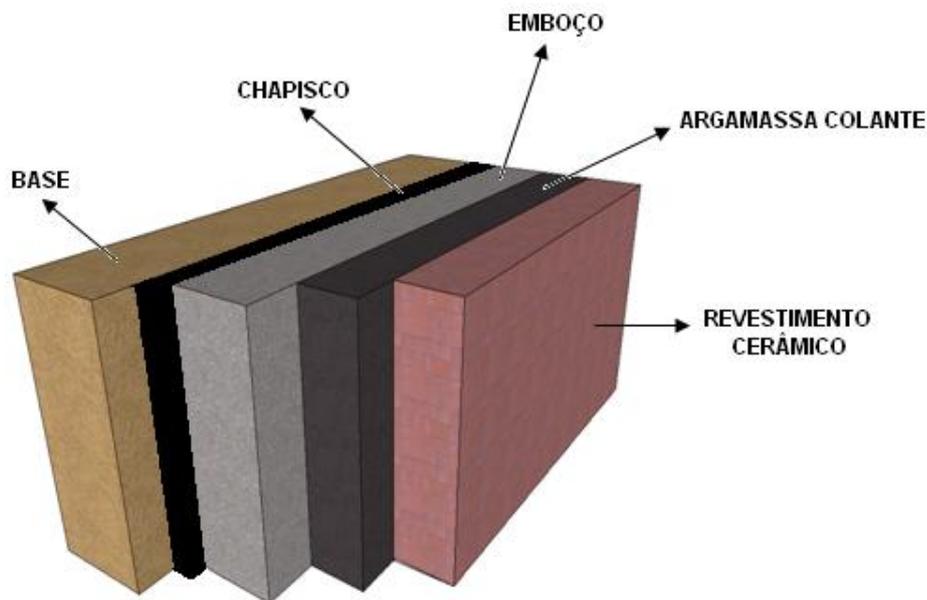


Figura 2.1 Estrutura de sistema de revestimento

A principal função do sistema de revestimento de fachadas é de estabelecer a separação entre o ambiente externo e interno, e para cumprir esta função deve atuar sempre como

barreira, controlando uma série de ações complexas, como proteger a edificação das intempéries, evitar a degradação dos materiais de construção e promover a segurança e conforto dos usuários.

Estando as camadas do sistema de revestimento intimamente ligadas entre si; a deformação de qualquer uma delas - devido às causas endógenas (tensões internas, peso próprio, etc.) ou exógenas (variação de temperatura, chuva, vento, ruído, umidade, etc.) - resultará em tensões de tração, compressão ou cisalhamento atuando sobre todo o conjunto. A seguir descrevem-se as características principais dessas camadas presentes no sistema de revestimento, e as propriedades que influenciam no aparecimento de patologias dentro do sistema de revestimento.

2.2.1 - Base

Geralmente, a base para o revestimento é constituída por componentes de alvenaria de diferentes tipos, entre eles os blocos cerâmicos e os blocos de concreto, ou por elementos estruturais de concreto como as vigas, os pilares, as lajes, etc.

O tipo de superfície da base é de suma importância dentro do sistema de revestimento, pois se tem que quanto mais rugosa ela for, maior será a sua resistência ao cisalhamento devido à maior aderência. As rugosidades na superfície aumentam a área de contato entre a argamassa e o substrato, fazendo aumentar a aderência.

2.2.2 - Chapisco

É uma argamassa empregada para regularizar a capacidade de sucção de água e aumentar a rugosidade superficial da base. O chapisco garante maior aderência, devido à sua superfície porosa, e é parte fundamental ao se executar o revestimento de uma parede de alvenaria. O chapisco será sempre necessário como base para revestimento de qualquer tipo de bloco, para se obter uma película rugosa, aderente, resistente e contínua.

Quando se tratar de estruturas de concreto, cuja película desmoldante não consiga ser removida de maneira eficiente, podem ser adicionadas emulsões de polímeros PVA,

acrílicos ou estirenos para melhorar a aderência caso a base apresente uma superfície muito lisa (JUST, 2001, apud ROSCOE, 2008).

O chapisco pode melhorar consideravelmente as características dos substratos, proporcionando uma maior aderência do sistema base-revestimento, já que ele favorece a sucção nos substratos pouco absorventes, diminuem a avidez por água dos substratos muito absorventes e auxiliam na adesão no estado fresco.

2.2.3 - Emboço

Segundo a NBR 13529:1995 o emboço é a camada de revestimento que serve para cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco, propiciando uma superfície capaz de receber mais outras camadas, como o reboco ou elemento decorativo, ou também se constituir no acabamento final.

As propriedades da argamassa de emboço influenciam o mecanismo de aderência e o descolamento das peças cerâmicas, sendo importante se avaliar as características desta, com a finalidade de garantir uma maior durabilidade do trabalho em conjunto dos elementos. Entre essas propriedades da argamassa, encontram-se duas fundamentais: a consistência que é a capacidade de resistir às deformações que lhe são impostas e a plasticidade que é a capacidade de manter a deformação resultante da ação de cargas externas, mesmo sendo retiradas as cargas, com ausência de ruptura.

(CARASEK, 1996, apud, CHAGAS, 2009) define que a trabalhabilidade do emboço é a habilidade de fluir ou espalhar-se sob a superfície do componente do substrato, por suas saliências, protuberâncias e fissuras, definindo a intimidade do contato entre a argamassa e o substrato relacionando-se assim com a extensão da aderência do revestimento.

2.2.4 - Argamassa Colante

Segundo COSTA e SILVA (2001), a argamassa é a camada de fixação responsável por unir as placas cerâmicas ao substrato, tem um papel fundamental na aderência das placas cerâmicas e, quando é incorretamente aplicada em fachadas, põe em risco a vida de

peças. Sem contar os danos à saúde que podem surgir devido à proliferação de fungos decorrente da umidade absorvida por uma parede sem revestimento. A argamassa também é definida por LOBATO e CARASEK (2001), como uma mistura constituída basicamente de cimento, areia e aditivos que possibilitam, a partir da adição de água, a formação de uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de peças cerâmicas para revestimento de paredes e pisos. A camada de argamassa colante também deve ser capaz de absorver as tensões acumuladas nas peças cerâmicas e garantir os requisitos de segurança e durabilidade dos revestimentos cerâmicos estabelecidos nos projetos.

Esta pesquisa concentra-se no desempenho da argamassa colante dentro do sistema de revestimento, portanto, faz-se um detalhamento mais profundo das propriedades desta camada e da sua importância na fixação das peças cerâmicas nas fachadas.

De acordo com UCHÔA (2007), as argamassas colantes são compostas por cimento Portland, grãos inertes de granulometria fina e resinas orgânicas como foi antes exposto. Busca-se a garantia de algumas propriedades para o bom funcionamento das argamassas colantes e para isto devemos ter:

- Tempo de vida, de abertura e de ajustabilidade da argamassa colante compatível com as condições de trabalho;
- Plasticidade e coesão tais que permitam o espalhamento e o ajuste das placas cerâmicas e evitem o escorregamento destas da posição correta;
- Retenção de água compatível com o tipo de substrato e de placa cerâmica;
- Espessura com a qual se consiga uma boa superfície de contato entre o substrato e as placas cerâmicas

A reposição de placas cerâmicas que se descolam devido à baixa qualidade da argamassa colante implica custos não só com a própria argamassa colante, mas com os revestimentos e com a mão-de-obra para sua colocação. Mais ainda, se a placa cerâmica não estiver mais disponibilizada no mercado, certamente isto vai exigir a troca de todo o revestimento das

paredes e por isso é importante uma boa escolha da argamassa a ser utilizada nas fachadas cerâmicas.

No Brasil o revestimento composto por argamassa colante e peças cerâmicas é largamente empregado nas edificações. Além do motivo cultural onde as edificações revestidas com peças cerâmicas são altamente valorizadas, a argamassa colante deve apresentar um grupo de propriedades tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, como por exemplo:

Quando fresca

- Adesão inicial: é a propriedade que a argamassa fresca de revestimento possui de permanecer adequadamente unida à base de aplicação.
- Consistência e plasticidade: esses fatores são os que podem garantir que o revestimento fique adequadamente aderido ao substrato e dar o acabamento superficial. A consistência e a plasticidade podem se alterar completamente em função da relação água/aglomerante, da relação aglomerante/areia e da natureza e qualidade do aglomerante.
- Retenção de água de consistência: é a propriedade que a argamassa possui de reter mais ou menos água quando a ela são aplicadas solicitações que provocam a perda de parte de água de amassamento durante o processo de cura. Estas solicitações podem ser devidas a três componentes: à evaporação, à sucção e à absorção pelo componente em contato.

Segundo SABATINI (2001), a retenção de água esta intimamente ligada com a tensão superficial da pasta aglomerante. Ao aumentar a superfície específica dos constituintes então se aumenta a capacidade de retenção de água, como também se utilizando aditivos, que por suas características, absorvam a água ou impeçam a percolação da água.

- Trabalhabilidade: segundo CAVALHEIRO (1990), esta propriedade é essencial para assegurar a extensão de aderência, ela provém da combinação de várias propriedades, tais como: plasticidade, fluidez e coesão, as quais a sua vez estão relacionadas com as seguintes características: relação água-aglomerante, relação

aglomerante-agregado úmido, natureza e qualidade dos aglomerantes e a distribuição granulométrica do agregado.

Quando endurecida

- Resistência mecânica (capacidade de absorver deformações): é a propriedade das argamassas endurecidas de acompanhar a deformação gerada por esforços internos ou externos de diversas origens e de retornar à dimensão original quando cessam esses esforços sem se romperem, ou através do surgimento de fissuras microscópicas que não comprometam o desempenho do revestimento no que diz respeito à aderência, estanqueidade e durabilidade.
- FIORITO (1994) descreve que as tensões de tração e o módulo de elasticidade são maiores nas argamassas ricas (maior teor de cimento), ou seja, as argamassas ricas deformam-se menos em relação às argamassas mais pobres (menor teor de cimento). Esta diferença nas tensões de tração entre as argamassas ricas e pobres são da ordem de 9 a 12 vezes.
- Permeabilidade: é a propriedade que caracteriza a passagem da água através de um material, componente ou elemento de construção, por meio de infiltração, capilaridade ou por difusão de vapor da água, esta permeabilidade na argamassa é definida pelo traço utilizado na sua mistura.

Segundo a NBR 14081:2005, as argamassas colantes podem ser classificadas em quatro tipos diferentes de acordo com o tempo em aberto, a resistência de aderência à tração e o deslizamento, estando vinculada à indicação do local de utilização e ao desempenho desejado. Pode-se observar esta classificação na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação das Argamassas Colantes segundo seu local de aplicação
(NBR14081:2005)

TIPOS	LOCAL DE APLICAÇÃO
ACI	Uso interior, com exceção de saunas, churrasqueiras, estufas e outras aplicações especiais.
ACII	Uso externo. Apresenta resistência à esforço de ciclos térmicos e higrotérmicos da ação da chuva e/ou vento e movimento de pedestres e máquinas e equipamentos
ACIII	Uso em saunas, piscinas, estufas e ambientes similares. Apresenta alta aderência à tração superior.
ACII-E	Similar ao tipo III com tempo em aberto estendido.

Entre as principais patologias que são encontradas no sistema de revestimento, FIORITO (1994) cita que a mais freqüente é o deslocamento do revestimento cerâmico. O autor lembra ainda que a retração da argamassa colante gera tensões internas de tração e que o grau de fissuração nas primeiras idades regulará a capacidade ou não do revestimento em resistir às movimentações que são provocadas por inúmeros fatores como, por exemplo:

- Movimentação volumétrica da base: a variação dimensional por umedecimento e secagem é a mais comum, que ocorre por ação dos agentes externos, como temperatura e umidade;
- Deformação da base: devido à deformação lenta do concreto da estrutura e recalques das fundações;
- Movimentação do revestimento: ligadas às condições climáticas, as variações de temperatura provocam o fenômeno de dilatação e contração do revestimento;
- Retração do revestimento: tensões internas são provocadas pelo movimento de retração em consequência de uma diminuição de volume devido à perda de água para a base, por evaporação, e ainda devido às reações de hidratação do cimento. Quando as tensões internas atuantes no revestimento superam a sua resistência à tração, surge a fissura. A retração pode ocorrer após a secagem do revestimento, por variações no ambiente.

2.2.5 - Cerâmica

Segundo a ABNT (NBR13816: 1997), a placa cerâmica para revestimento é definida como sendo um material composto por argila e outras matérias primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, sendo formada por extrusão ou por prensagem, podendo também ser conformado por outros processos e queimadas a altas temperaturas.

As principais propriedades das placas cerâmicas são: dureza, rigidez, fragilidade e inércia, atingindo temperaturas de queima entre 1000°C e 1200°C. A finalidade da utilização da placa cerâmica para revestimento é a proteção do substrato onde ela é assentada. A resistência ao choque térmico de tais placas é uma característica importante para fachadas e pisos externos quando, em calor excessivo, ocorrem pancadas de chuva. O uso de placas cerâmicas certificadas na execução do sistema de revestimento cerâmico é um princípio básico para a obtenção da qualidade do acabamento final.

Os tamanhos mais comuns utilizados para fachadas (10x10)cm e (10x20)cm, de infinitos modelos e cores. A se utilizar tamanhos maiores deve-se ter cuidado com as juntas, sendo elas mais resistentes às intempéries que as placas cerâmicas de uso interno. Na Figura 2.2 podem-se observar fachadas com revestimento cerâmicas comumente utilizadas na cidade de Brasília.

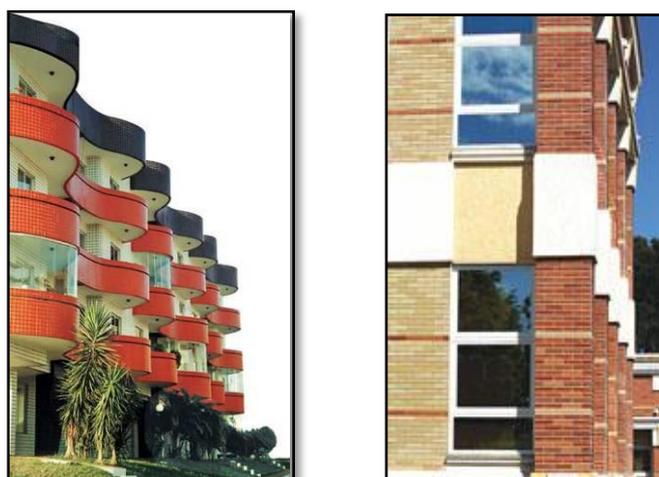


Figura 2.2 - Fachadas de Revestimento Cerâmico. (<https://www.google.com.br/revestimento+ceramico>)

2.2.6 – Rejunte

O propósito das juntas de assentamento é permitir a movimentação unitária da peça cerâmica, a propagação de vapor de água e o alívio de tensões. A sua localização segundo NÓBREGA e KAMINE (1995), permite determinar e alinhar nelas mesmas a grande parte do potencial de fissuração causada por mudanças de volume e movimentação de fissuração. Por isso devem se localizar nas regiões onde ocorre acúmulo de tensões sobre o revestimento (no encontro coplanar da alvenaria com a estrutura) e quando se deseja dividir o revestimento em painéis menores.

FIORITO (1994) sugere que as juntas horizontais estejam localizadas a cada pavimento e as verticais a cada 6 m, para painéis superiores a 24 m², estas devem permitir esconder possíveis fissuras e promover um correto escoamento de água, apresentando um funcionamento adequado, para conseguir isto, FIORITO (1994), também afirma que as juntas sejam executadas utilizando-se ferramentas adequadas, que permitam o seu adequado posicionamento e alinhamento.

Segundo (UNGINGER, 2003 apud CHAGAS, 2009), a principal função do rejunte é absorver os esforços decorrentes da movimentação da cerâmica e da base de forma a aliviar as tensões sobre o sistema de revestimento, prolongando desta forma a sua vida útil.

O rejunte está formado geralmente por uma argamassa de cimento misturada com resinas, isso com a finalidade de reduzir a sua permeabilidade e tornando-lhe menos rígido. As juntas são consideradas pontos críticos nos projetos de fachadas. Elas apresentam sua deterioração quando há perda de estanqueidade do revestimento.

Segundo SARAIVA *et al.*(2002) a tensão na interface junta/argamassa colante aumenta de acordo com a capacidade de deformabilidade da argamassa colante, uma vez que um módulo de elasticidade baixo permite um maior deslocamento relativo entre peças cerâmicas e argamassa colante, de maneira a “forçar” com mais intensidade a saída do rejunte.

2.3 ESTUDOS SOBRE TENSÕES E FADIGA EM REVESTIMENTOS

As pesquisas sobre as argamassas colantes começaram nos Estados Unidos a partir do fim da Segunda Guerra Mundial (1945) com a finalidade de racionalizar os serviços de colocação de revestimentos cerâmicos e oferecer aos consumidores uma alta qualidade nas instalações destes revestimentos a um menor custo possível. Por volta de 1971, foi introduzida a primeira argamassa colante brasileira, porém a preocupação com este material e com as normas pertinentes começaram apenas na década de 90 (SARAIVA, 1998).

SARAIVA et al. 2002 verificou a partir de estudos numéricos via método dos Elementos Finitos que as tensões existentes na interface argamassa colante e cerâmica quando submetidas a esforços térmicos vão depender do tipo de cerâmica utilizada no modelo de revestimento, seja clara ou escura. Os resultados alcançados mostraram que as tensões aumentam consideravelmente (em torno de 60%) ao se empregar cerâmicas com alto coeficiente de absorção térmica (de cores escuras). Além disso, os autores concluíram que o uso de rejuntas com menor módulo de elasticidade, produz um aumento nas tensões de cisalhamento na interface argamassa colante/cerâmica/rejuntas e uma diminuição nas tensões de compressão nas cerâmicas.

THOMAZ (1989), afirma que as fissuras em argamassas de revestimento provocadas por movimentações térmicas das paredes dependem, 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 isso não seja possível, deve-se fazer uso de juntas capazes de absorver as deformações diferenciais, o que é a concepção básica dos sistemas de revestimentos cerâmicos.

Segundo BROEK (1988), 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 escoamento do material; resultando com isto tensões cíclicas no sistema de revestimento, provocando fissuras ativas, as quais se movimentam na interface

emboço/argamassa colante e cerâmica, gerando o deslocamento pela perda de aderência entre as camadas, processo denominado fenômeno da fadiga.

CERVO (2004), através de um estudo experimental sobre a resistência à fadiga de concreto de cimento Portland convencional para pavimentos, propôs um modelo de ruptura por fadiga a partir da regressão linear dos resultados obtidos nos ensaios cíclicos. Os resultados mostraram que conforme se aumenta a frequência, o número de ciclos à fadiga também aumenta, para uma mesma relação entre tensões. Nos ensaios com tensão variável notou-se que ao se diminuir a tensão, o número de ciclos também diminuiu.

UCHÔA (2007) propôs uma metodologia numérico-experimental, considerando a variação cíclica de temperatura da cidade de Brasília. O autor projetou e realizou ensaios em corpos-de-prova de argamassa de emboço sob carga cíclica e com isso verificou o comportamento à fadiga à tração da argamassa a partir da curva S-N traçada.

De acordo com (PASTOUKHOV e VOORWALD, 1995 apud CHAGAS, 2009), a fadiga é um tipo especial de fratura que se caracteriza pela significativa duração das ações externas (carregamento mecânico, temperatura e meio ambiente), provocando alterações no elemento estrutural durante esse período.

SILVA e FORTES (2010), afirmam que as causas mais frequentes de fissuras nos revestimentos argamassa dos são causadas por: retração, devido a aberturas de vãos, recalque, devido à movimentação higroscópica e a movimentação térmica.

O fenômeno da fadiga pode ser explicado tendo-se como base a mecânica da fratura, a qual também é considerada como sendo a mecânica das trincas, cujo objetivo é a determinação do limite da capacidade de carga, incluindo como principal parâmetro o valor da carga crítica devido à propagação de trinca. A maioria das estruturas de engenharia está sujeita a cargas que são de um modo geral variáveis no tempo, mesmo que o carregamento seja estático, em uma primeira observação. Uma falha por fadiga ocorre dentro de uma gama bastante ampla de ciclos de carga, desde valores da ordem de 10 ciclos até mais de 10^8 ciclos. O número de ciclos que o componente resiste depende do nível da solicitação, pois com uma carga dinâmica maior tem-se uma vida baixa, sensivelmente reduzida quando

comparada com uma situação onde a solicitação cíclica é menor, o que leva a uma maior vida.

No seguinte capítulo encontra-se uma descrição dos fundamentos teóricos utilizados nesta pesquisa, e a importância que eles têm para o entendimento do processo de fadiga causado pelo choque térmico no sistema de revestimento em fachadas.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para entender o comportamento do sistema de revestimento submetido à fadiga pelo choque térmico, estudaram-se alguns conceitos e teorias que explicam tal desempenho, como são os princípios da mecânica da fratura, as curvas S-N ou de Wöhler, a teoria de acumulação de danos, o efeito do choque térmico e a fadiga no sistema de revestimento, apresentadas neste capítulo a seguir.

3.1 PRINCÍPIOS DA MECÂNICA DA FRATURA

Nesta pesquisa será considerada a argamassa colante como um material frágil, para com isto trabalhar com os princípios da mecânica de fratura linear elástica (MFLE), ou seja, a sua ruptura à fadiga dá-se no regime elástico. A resistência do material à fratura frágil se dá sob condições de deformação plana e o processo de fratura é controlado pelas tensões elásticas presentes na ponta da trinca. Para que o processo de nucleação inicie é necessário que ocorram deformações plásticas, que estas sejam generalizadas, ou seja, que sejam confinadas a um pequeno volume de material, conseguindo com isto que as tensões nominais devidas ao carregamento externo fiquem dentro do regime elástico.

Dependendo do tipo de sollicitação sobre a trinca, esta pode ser classificada segundo sua sollicitação de trabalhando em três modos distintos de carregamento, visualizado na Figura 3.1.

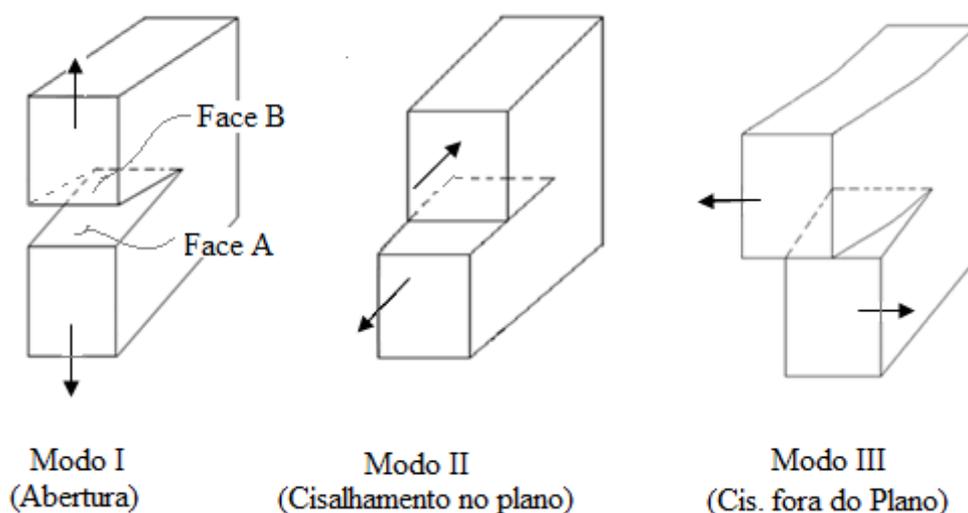


Figura 3.1 - Modos básicos de carregamentos em uma trinca.

Descrição dos modos de carregamento da Figura 3.1:

- Modo I – Tensão ou abertura da ponta da trinca: carregamento em tração, deslocamento das superfícies da trinca perpendicularmente a si mesmas;
- Modo II – Tensão no plano: Cisalhamento puro, deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesmas e perpendicularmente à frente de propagação;
- Modo III – Tensão anti-plano: Cisalhamento fora do plano, deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesmas.

Cada modo está associado a um fator de intensidade de tensões: KI para o modo I; KII para o modo II e KIII para o modo III. O valor crítico de KI, KIC, é uma propriedade do material e é chamado de tenacidade à fratura, conforme apresenta na Figura 3.2.

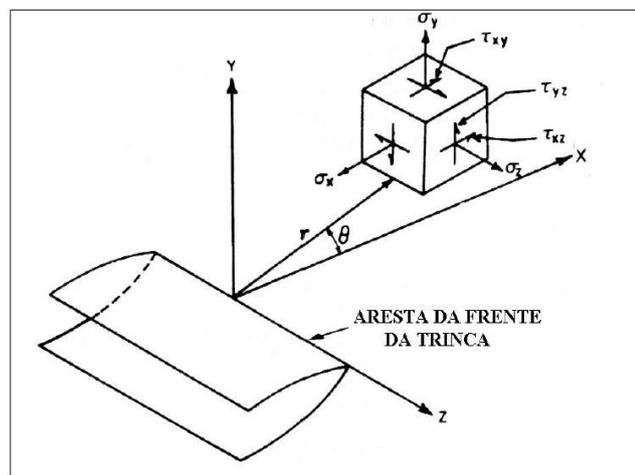


Figura 3.2 - Coordenadas na frente da trinca (MECÂNICA DA FRATURA-FADIGA)

Para conhecer a distribuição das tensões num ponto, tensões de tração (σ_x e σ_y) e cisalhamento (τ_{xy}), o cálculo vai depender da distância radial “r” e do ângulo “ θ ” de orientação da região infinitesimal, usando para isso as seguintes equações:

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.1)$$

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (3.2)$$

$$\tau_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3.3)$$

Das equações 3.1, 3.2 e 3.3 pode-se deduzir que para a ponta da trinca ($r \rightarrow 0$), todas as componentes de tensão tendem ao infinito. A tendência do estado de tensão numa ponta de trinca é plastificar a ponta da trinca devido a que os materiais não suportam tensão acima das respectivas tensões últimas ou de ruptura. No caso da argamassa que é um material frágil a plastificação assume dimensões menores do que para materiais dúcteis, 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. (UCHÔA, 2007).

A fadiga cíclica está relacionada às particularidades das tensões existentes na ponta da trinca e que são estudadas na Mecânica da Fratura. A fadiga cíclica pode mesmo ocorrer sob tensões inferiores em relação ao limite de escoamento estático do material sob um número elevado de ciclos de carga. Saber a vida útil de uma amostra de um material, em relação à fadiga por propagação da fratura é de grande importância. Para isso, nesta pesquisa, foram utilizados ensaios de laboratório. Um material semelhante à argamassa colante; ou seja, um material com comportamento frágil típico da argamassa colante é o concreto. Este trabalho se baseia em ensaios de fadiga aplicados ao concreto (KUPFER *et al.*, 1969 apud UCHÔA, 2007). Observa-se que em um determinado material, a fadiga pode ser produzida mais rapidamente dependendo do nível de tensão e do número de ciclos aplicados. Sendo a fadiga um fenômeno físico de deterioração progressiva do material, ela também pode ocorrer em baixos níveis de carregamento.

O processo de Fadiga apresenta quatro etapas principais, como ilustra a Figura 3.3:

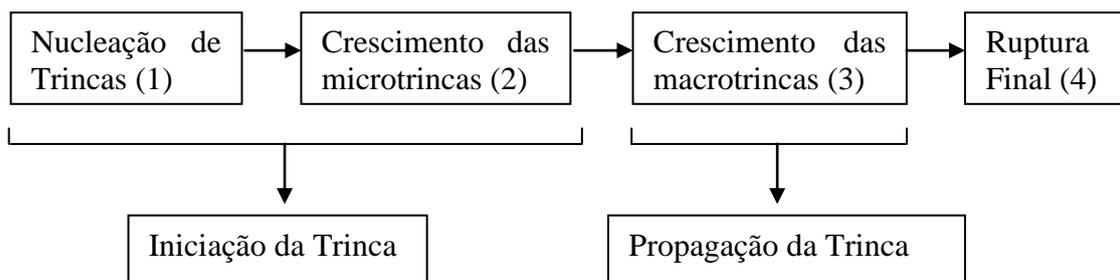


Figura 3.3- Desenvolvimento do Processo de Fadiga(BROEK,1988).

Onde,

- (1) Iniciação de uma ou mais fissuras (microfissuras), o crescimento é muito lento;
- (2) E (3) As trincas crescem gradualmente por efeito de cada ciclo, aparecem quando estão próximas de produzir a ruptura do elemento.
- (4) Tem-se a ruptura do elemento, pelo crescimento rápido das fissuras, reduzindo a área resistente do componente, resultando numa fratura final do tipo frágil.

Como exposto acima, a falha começa com pequenas fissuras, que conforme vão crescendo reduzem a seção resistente, e levam o elemento à ruptura final, por uma propagação brusca da fissura, por isso a vida em fadiga de um material apresenta duas etapas principais que são o período de iniciação da trinca e o período de propagação da trinca.

3.2 CARACTERIZAÇÃO PRÁTICA DA FADIGA - CURVA S-N

A curva S-N é construída a partir de ensaios experimentais de flexão rotativa ou compressão e tração. As curvas S-N de um material definem os valores de tensão alternada versus o número de ciclos necessários para causar falha, chegando-se, a saber, o limite de fadiga do material, e podendo-se encontrar a máxima tensão alternante que a estrutura, ou elemento estrutural, suporta independente do número de ciclos de carga. Na Figura 3.4 se amostra uma curva típica S-N. O eixo vertical (y) representa a tensão alternada (S) e o eixo horizontal (x) representa o número de ciclos (N). A curva S-N tem como base a taxa de tensão ou a tensão média σ_{Rf} , sendo possível definir múltiplas curvas S-N com taxas de tensão diferentes para um mesmo material.

Na Figura 3.4, pode-se observar que a curva tende a se tornar horizontal quando o número de ciclos para o rompimento do material torna-se praticamente infinito, ou seja, enquanto diminui a tensão aplicada o material resiste um maior número de ciclos, chegando ao seu limite de fadiga, que é o valor limite de tensão abaixo da qual teoricamente não ocorre a falha por fadiga.

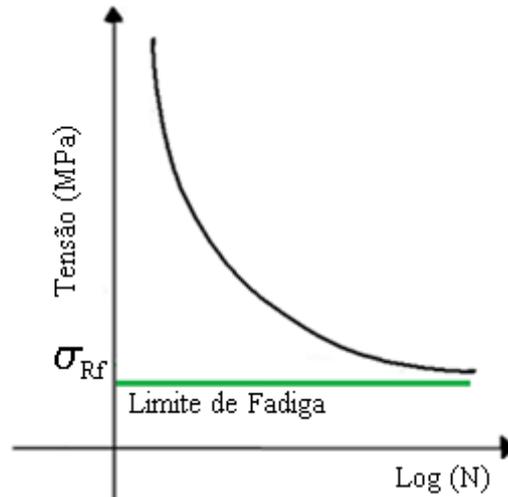


Figura 3.4- Curva S-N qualitativa.

Neste estudo é levantado também o diagrama de variação de tensão no interior do revestimento, considerando que o processo de deslocamento de placas cerâmicas é causado pelas tensões cíclicas decorrentes da variação de temperatura, ou seja, pelo fenômeno da fadiga devido ao choque térmico. A Figura 3.5 mostra um diagrama típico de variação de tensão com o tempo.

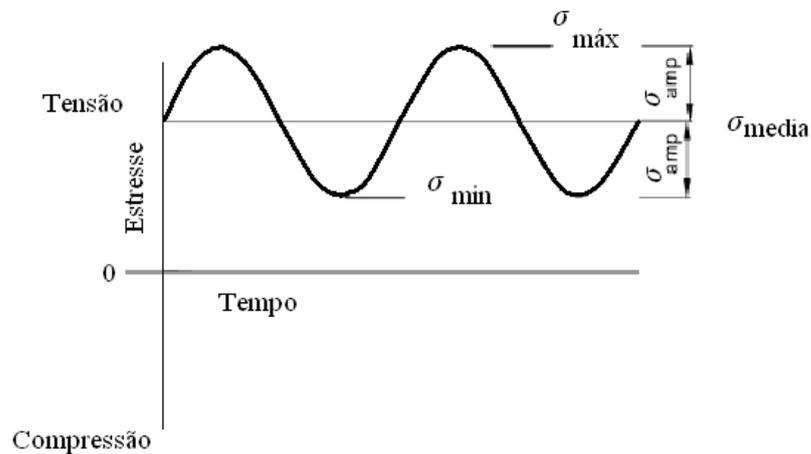


Figura 3.5- Variação de tensão em função do tempo.

Observa-se na Figura 3.5 que a resistência à fadiga está diretamente relacionada ao valor das variações de tensões máximas e mínimas, σ_{amp} , aplicadas no material. Se o valor σ_{amp} for inferior ao limite de fadiga, a repetição do carregamento não causará a ruptura do material.

A Figura 3.5 pode ser escrita em termos das seguintes equações:

$$\sigma_m = \left[\frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{min}}}{2} \right] \quad (3.4)$$

$$\sigma_a = \left[\frac{\sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{min}}}{2} \right] \quad (3.5)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{min}} = \sigma \quad (3.6)$$

$$R = \left[\frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{máx}}} \right] \quad (3.7)$$

Onde, σ_m é o valor da tensão média, σ_a é a amplitude do carregamento, a variação de tensão é representada por $\Delta\sigma$ ou σ e tendo R como a razão entre a tensão mínima e máxima.

3.3 TEORIA DE ACUMULAÇÃO DE DANOS

Para se avaliar o nível de ruptura de uma material sob tensão cíclica, o modelo mais utilizado na predição do dano acumulado é o proposto por Palmgren, em 1924, e desenvolvido por Miner, em 1945. Palmgren supôs que a aplicação de n_i ciclos consome uma fração de vida que é igual ao quociente r_i de n_i/N_i , onde N_i é o número de ciclos a ruptura no ensaio de amplitude constante, executado nas mesmas condições de tensão média e amplitude de tensão, sendo r_i a relação de ciclos, correspondente ao dano produzido a um nível de tensão específica. Também considerou que a falha do componente se produz quando a soma de todas as frações de vida consegue a unidade, mostrado na Equação 3.8.

$$\frac{n_i}{N_i} = r_i \quad (3.8)$$

Então, a energia acumulada leva a uma soma linear das razões de ciclo ou dano. A falha é considerada quando $\sum \frac{n_i}{N_i} = 1$, ou seja, a razão de ciclos correspondente a um nível de

tensão. Na Figura 3.6 se pode observar o modelo Palmgreen-Miner para diferentes ciclos de rotura.

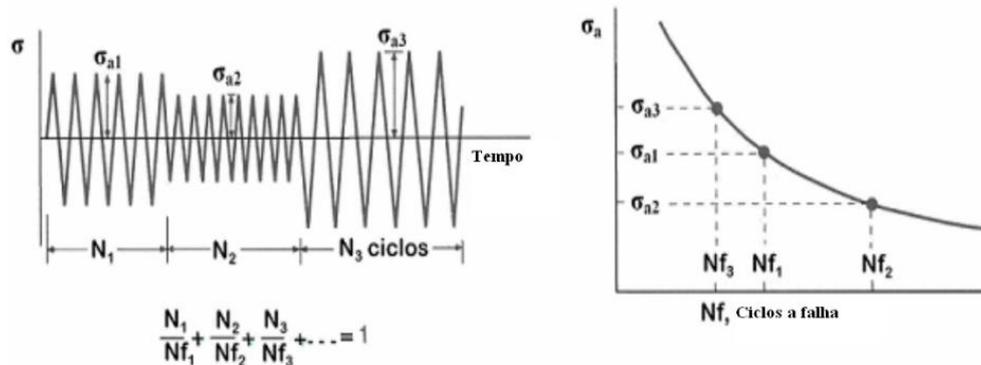


Figura 3.6 Uso do modelo Palmgreen-Miner para a predição de vida com uma amplitude de carga variável (HENY e VERA, 2007)

3.4 EFEITOS DO CHOQUE TÉRMICO NO REVESTIMENTO

O choque térmico é definido segundo TEMOCHE e BARROS (2006), como o fenômeno produzido por uma variação de temperatura rápida e transiente em um sólido cujo resultado é um estado de tensões térmicas. Sendo as tensões de tração, compressão e cisalhamento de origem térmica as principais responsáveis pelo deslocamento de peças cerâmicas, pois provocam movimentos de expansão e contração que podem prejudicar a aderência dos revestimentos cerâmicos. 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.

Quando o material trabalha em temperaturas diferentes da temperatura ambiente, as suas propriedades mecânicas sofrem alterações e, portanto a resistência à fadiga também é influenciada. Ficando as paredes exteriores dos edifícios, devido à sua exposição com os agentes atmosféricos, sujeitas a suas ações, funcionando como interface entre o exterior e o interior, sendo a chuva, o vento, a amplitude térmica diária e mesmo momentânea com valores significativos, a influência da luz solar e a umidade do ar, as principais solicitações pelas quais é afetado o sistema de revestimento.

Segundo CHAGAS (2009), no ensaio de fadiga realizado sob temperatura inferior à do ambiente, observou-se um aumento da resistência à fadiga do material, em condição oposta, o material quando submetido a elevadas temperaturas apresentou um decréscimo de sua resistência à fadiga, com isto as variações térmicas, para mais ou para menos, pode levar ao sistema de revestimento à ruptura por fadiga na ligação revestimento- suporte.

As tensões no sistema de revestimento dependem além de outros fatores da variação da temperatura, tendo-se a tensão de tração e a tensão de compressão como resultado dessa variação. Elas ocorrem devido ao aumento seguido da diminuição de temperatura. As tensões térmicas provocam movimentos de expansão e contração que podem prejudicar a aderência dos revestimentos cerâmicos. (FIORITO, 1994).

Na Figura 3.7 se tem um sistema de revestimento comumente utilizado nas fechadas na cidade de Brasília e é o modelo com o qual se trabalhou nesta pesquisa, distribuindo-se em quatro camadas, base, argamassa de emboço, argamassa colante e o revestimento cerâmico que contem o rejunte.

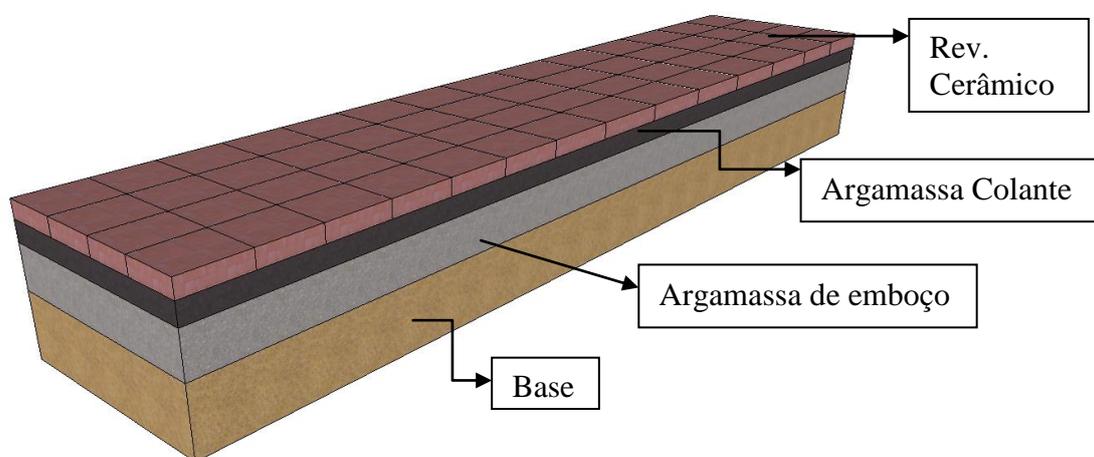


Figura 3.7- Sistema de revestimento na temperatura ambiente (T)

A tensão de tração no sistema ocorre com um aumento gradual da temperatura, que causa o afastamento das placas umas das outras, fazendo com que as juntas presentes no sistema de revestimento se separem, iniciando, assim, o processo de cisalhamento simples entre a base das peças e a argamassa colante, ($T_1 > T$). Como é mostrado na Figura 3.8.

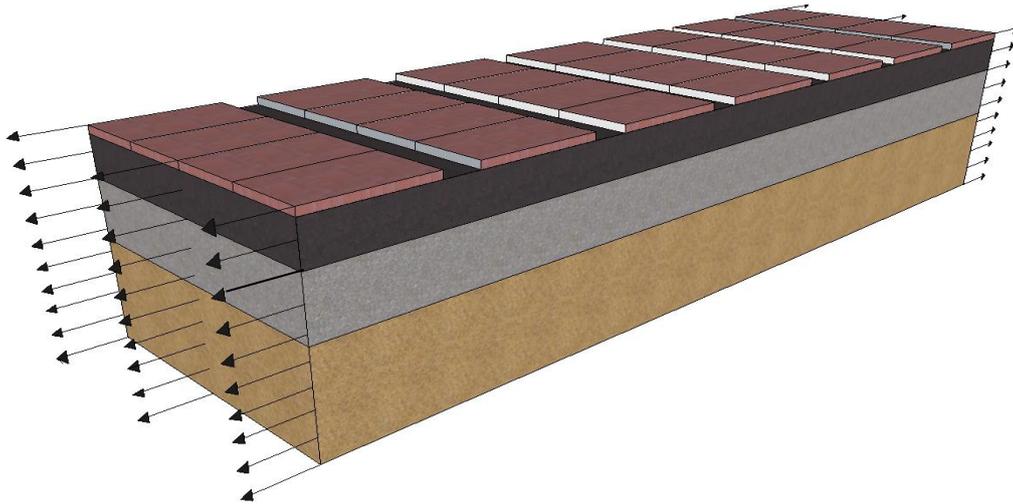


Figura 3.8- Sistema de Revestimento sujeito a cisalhamento simples.

A redução gradual da temperatura ($T_2 < T$) faz que as peças do sistema fiquem muito próximas umas das outras, ficando estas soltas e se tornando em forma de um “V” invertido, como é mostrado na Figura 3.9.

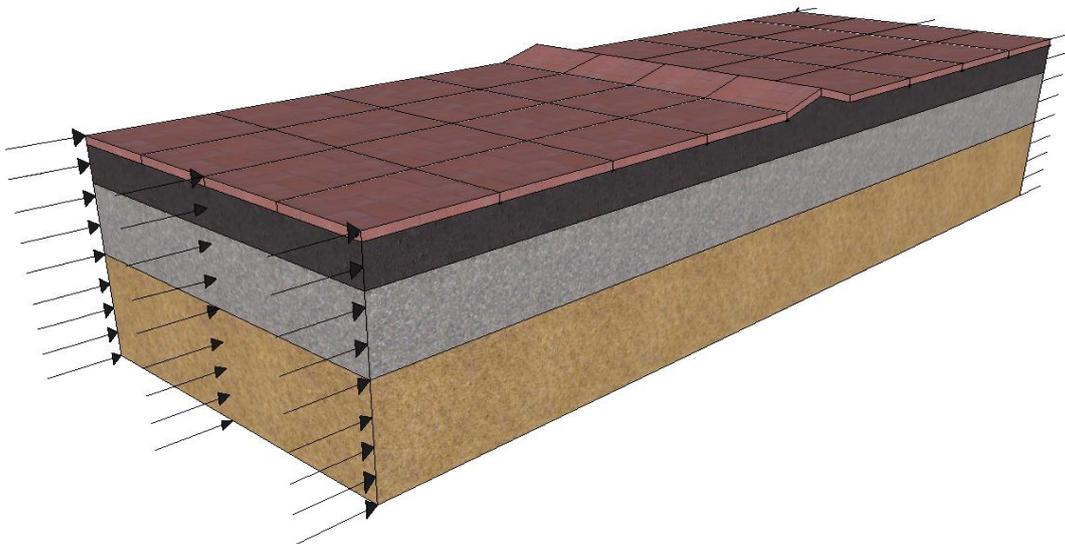


Figura 3.9- Sistema de revestimento sujeito à tensão de tração ($T_2 < T$).

A tensão de compressão do sistema de revestimento cerâmico é originada pela retração da argamassa colante, retraindo-se nas extremidades causando tensões de cisalhamento. Conseqüentemente, a distância “d” inicial da placa diminui para “d₁”, conforme apresentado na Figura 3.10 (FIORITO, 1994).

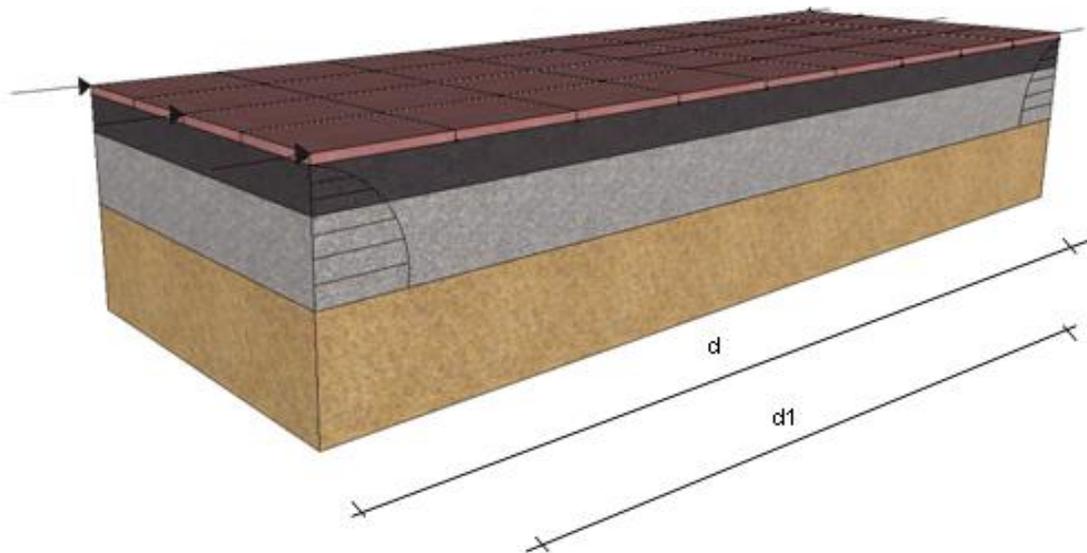


Figura 3.10- Revestimento solicitado à compressão por tração.

Na Figura 3.11 se pode observar que a força “p” é a componente vertical de tração que tende a arrancar o revestimento de sua base. Enquanto, a força “q” representa a resistência de aderência que se opõe à força “p”. Quando a aderência for maior que a componente vertical de tração ($q > p$), haverá compressão, mas o revestimento permanece estável (FIORITO, 1994).

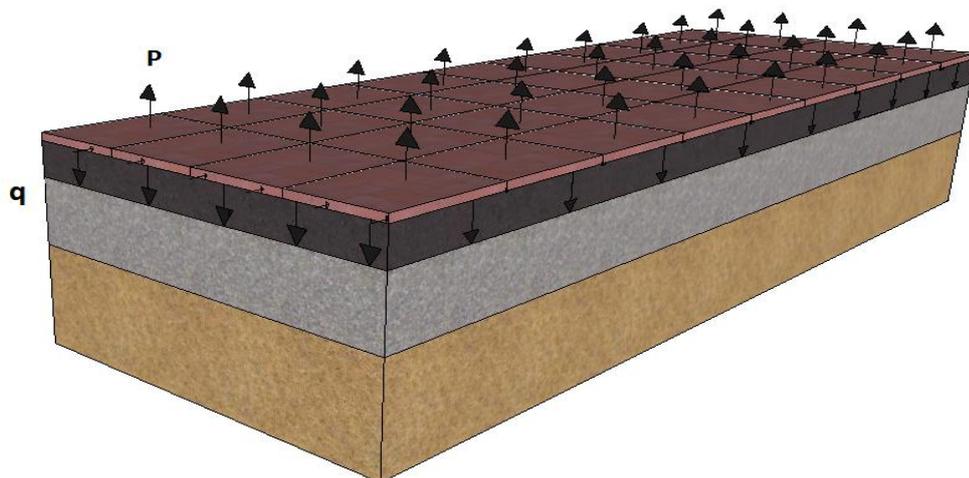


Figura 3.11- Representação das forças “p” e “q” atuando no revestimento cerâmico.

As peças cerâmicas se soltam da base quando a força “p” é maior ou igual à resistência de aderência “q”, como é mostrado na Figura 3.12, ocorrendo assim o abaulamento das placas cerâmicas e o seu posterior colapso como mostrado na Figura 3.13 (FIORITO, 1994).

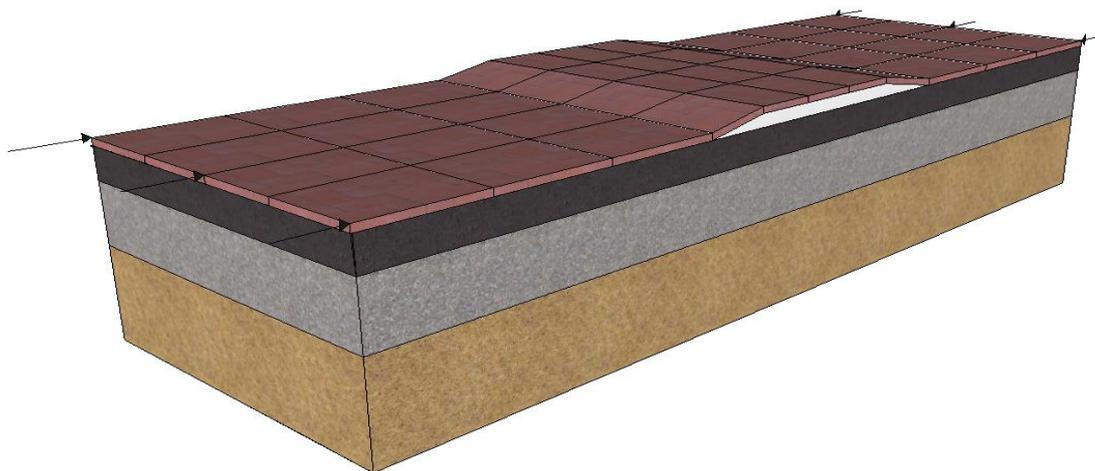


Figura 3.12- Sistema de revestimento entrando em colapso, $q \leq p$.

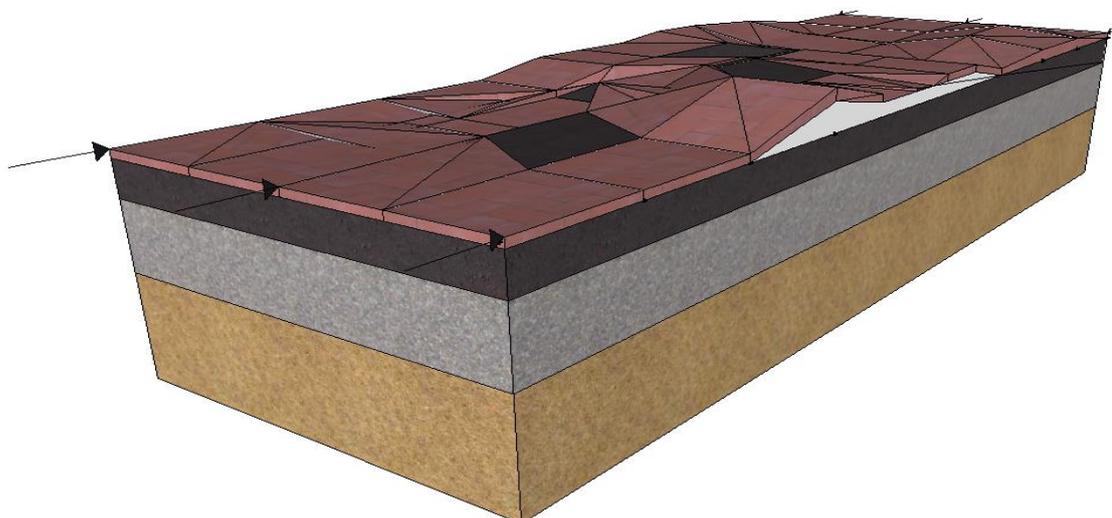


Figura 3.13- Colapso do sistema de revestimento.

O deslocamento do sistema de revestimento cerâmico, provocado pelas tensões de tração e compressão atuantes sobre o sistema, pode gerar perdas econômicas, além de poder ocasionar acidentes fatais se cair sobre pedestres. Para se evitar o risco de colapso do sistema de revestimento devem-se ter cuidados no planejamento e execução do mesmo, como por exemplo:

- Ter conhecimento das propriedades físicas e mecânicas dos materiais que formam o sistema de revestimento;
- Fazer um bom controle de cura para amenizar a retração da argamassa colante em função da perda de água;

- Aplicar corretamente as juntas de dilatação e de assentamento entre as peças cerâmicas para limitar as tensões térmicas ou de outras origens;
- A mão-de-obra empregada durante o assentamento deve ser treinada e especializada no domínio de execução do revestimento cerâmico, para com isso ter menor desperdício de materiais.

3.4.1 - Troca de Calor em Fachadas

É importante para o estudo do comportamento térmico das fachadas, fazer uma análise do desempenho do sistema de revestimento quando este é solicitado a uma intensidade de radiação solar. Os efeitos gerados pela radiação solar vão depender dos seguintes fatores:

- A cor da superfície do sistema de revestimento, quanto mais escura a cor da cerâmica, a absorção da radiação solar ser maior, ou seja, elas atingem maiores graus de temperatura que as superfícies de cor clara, nas mesmas condições de insolação.
- Da localização da fachada, a inclinação solar no dia, que vai fazer depender a intensidade da radiação solar.
- Características da superfície do sistema de revestimento, como rugosidade, como também a velocidade do ar, orientação da superfície, entre outras.

As variações térmicas causam deformações nos sentidos do plano principal das peças cerâmicas e o arqueamento de peças individuais, a radiação solar aquece mais a superfície do revestimento, causando seu arqueamento e tendência de descolar da argamassa colante. Além dessas variações térmicas também se tem outras ações atuando no sistema como a chuva, o vento, o ruído, a umidade entre outras como se podem observar na Figura 3.14, as quais causam um descolamento das peças cerâmicas dentro do sistema de revestimento que se vê submetido a elas.

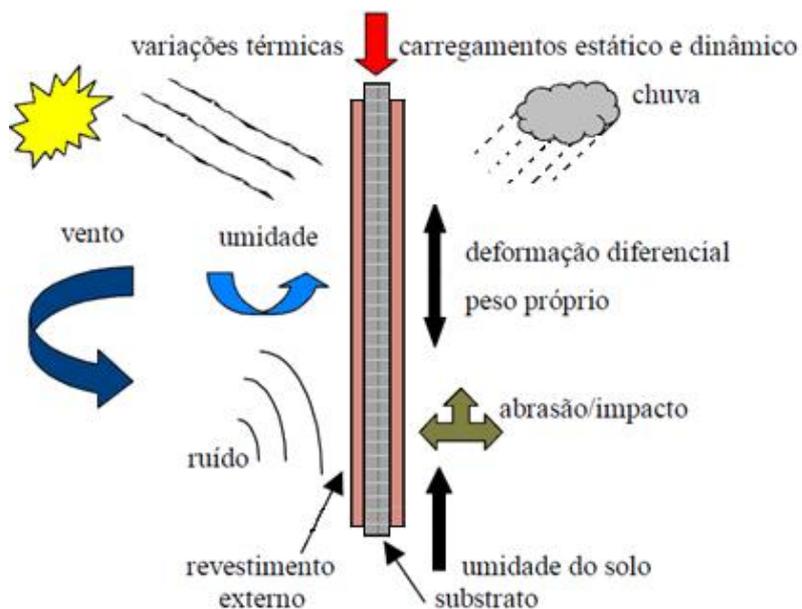


Figura 3.14- Diferentes ações no sistema de revestimento.

Para a análise numérica feita nesta pesquisa, considerou-se os mecanismos de troca de calor por condução definidos por RIVERO (1985) e FROTA E SCHIFFER (2003) e trabalhados por UCHÔA (2007), onde se simulam as tensões de origem térmica no sistema de revestimento cerâmico, como apresentado na Figura 3.15:

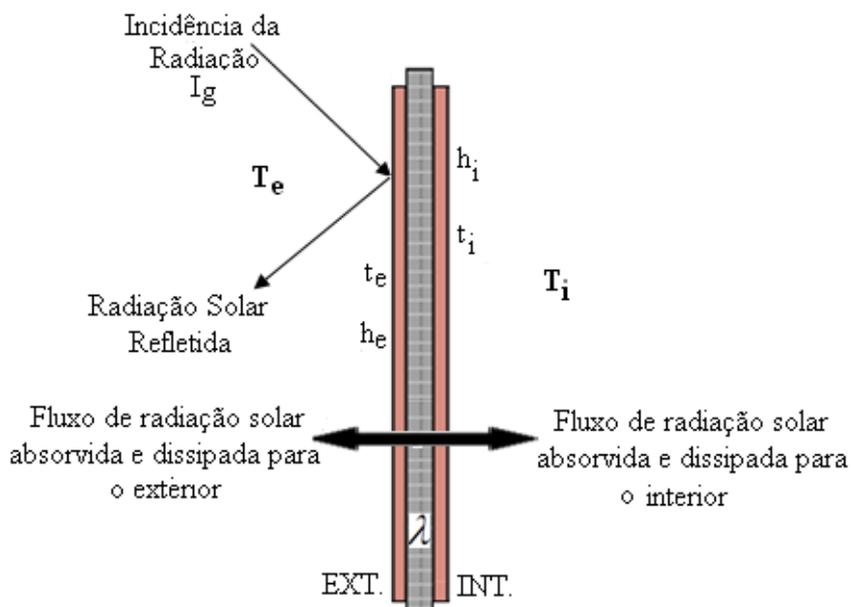


Figura 3.15 - Troca de Calor através de paredes.

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 ($W/m^2\cdot^{\circ}C$);

h_i : Coeficiente de condutância térmica superficial interna ($W/m^2\cdot^{\circ}C$);

λ : Coeficiente de condutância térmica ($W/m\cdot^{\circ}C$).

Considerando-se a variação do clima, se este for frio ou quente para a análise térmica, o estudo nos dois períodos baseia-se nas variações da temperatura do ar e do parâmetro de radiação solar respectivamente, para o clima quente usamos o conceito de temperatura equivalente, para determinar a temperatura do sistema de revestimento.

Segundo UCHÔA (2007), para o cálculo da temperatura equivalente é utilizada a seguinte equação:

$$t_q = T_e + \frac{\alpha \cdot I_g}{h_e} - \frac{\xi}{h_e} \cdot \Delta I_L \quad (3.9)$$

Onde:

t_q = Temperatura equivalente em $^{\circ}C$;

T_e = Temperatura do ar em $^{\circ}C$;

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 $W/m^2\cdot^{\circ}C$ (valor que leva em conta os intercâmbios de calor por convecção e por radiação entre a superfície e o meio);

ξ = Emissividade da superfície;

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

Segundo RIBERIO (1985) para a equação anterior, por dados experimentais tem-se que o termo $(\xi / h_e \cdot \Delta I_L)$ é igual a $4^{\circ}C$ para o plano horizontal e $0^{\circ}C$ para o plano vertical, em

qualquer hora do dia, como a maioria das fachadas estão no plano vertical nós consideramos o valor de 0°C para esse término.

Adotando o modelo utilizado por UCHÔA (2007) para calcular as temperaturas internas no sistema de revestimento como o mostrado na Figura 3.16:

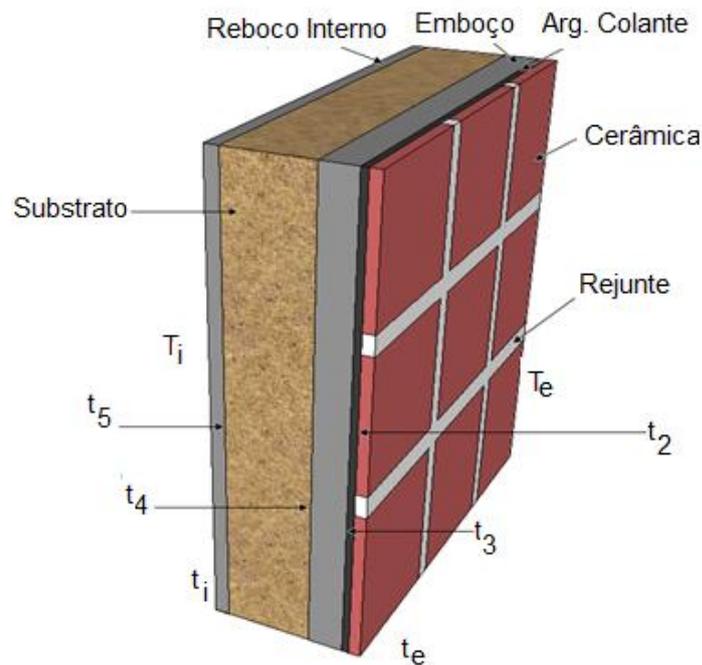


Figura 3.16- Temperaturas internas nas interfaces do revestimento.

Fazem-se os cálculos baseando-se nas equações a seguir, o qual foi um método apresentado por COSTA (1974), termos definidos como resistência térmica (Rt) e fluxo térmico(Q).

$$Rt = \frac{\Delta t}{Q} \quad (3.10)$$

Sendo:

$$Q = K. S. \frac{\Delta t}{L} \quad (3.11)$$

Portanto,

$$R_t = \frac{L}{K \cdot S} \quad (3.12)$$

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 condutividade 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).

Como se trabalha com um sistema de revestimento que tem diferentes camadas, a resistência térmica é definida por a resistência térmica de cada uma das camadas da seguinte maneira:

$$R_t = \sum \frac{L}{K \cdot S} \quad (3.13)$$

A somatória da resistência térmica das camadas é dada por:

$$R_t = \frac{L_{\text{Cerâmica}}}{K_{\text{Cerâmica}} \cdot S} + \frac{L_{\text{Arg.Colante}}}{K_{\text{Arg.Colante}} \cdot S} + \frac{L_{\text{Emboço}}}{K_{\text{Emboço}} \cdot S} + \frac{L_{\text{Substrato}}}{K_{\text{Substrato}} \cdot S} + \frac{L_{\text{Reb.Interno}}}{K_{\text{Reb.Interno}} \cdot S} \quad (3.14)$$

Seguindo os passos de Uchôa (2007), para o cálculo das temperaturas internas, utilizando-se as equações anteriores, o primeiro que se calcula é a temperatura equivalente “ t_q ” e posteriormente a diferença total $\Delta t = t_e - t_i$. Uma vez conhecida a resistência térmica R_t para cada uma das camadas do sistema de revestimento, calcula-se o Q . Assim pode-se calcular a diferença total de temperatura para todas as camadas.

3.5 FADIGA EM SISTEMAS DE REVESTIMENTO

3.5.1 Fundamentos das tensões térmicas:

O processo de degradação por fadiga está ligado à deterioração sob carregamento cíclico que leva ao surgimento e à evolução de microfissuras ou à propagação de microfissuras pré-existentes no material, podendo causar a ruptura da estrutura. Quanto maior o nível de tensão máxima usada, menor será o número de ciclos alcançados, e com isto mais rapidamente a argamassa se deteriorará por fadiga, para uma mesma frequência de carregamento. Os sistemas de revestimento estão sujeitos a um incremento de tensão devido às diferenças de temperatura entre o topo e o fundo da parede e o sistema de revestimento, gerando com isto grandes diferenciais térmicos que causam o empenamento do revestimento.

É por isso que esta pesquisa leva em conta as tensões térmicas particularizando este estudo para a cidade de Brasília, a qual possui um clima tropical, apresenta uma altitude de 1100m, tem verão úmido e chuvoso e um inverno seco e relativamente frio. A temperatura média anual é cerca de 21°C , podendo chegar aos 29,7°C de média das máximas em setembro, e aos 12,5°C de média das mínimas nas madrugadas de inverno em julho. A mínima absoluta histórica foi de 1,6°C em 1975 (fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) sendo acompanhada de uma geada. A máxima absoluta histórica foi de 34,6°C em 12 de outubro de 1963 (Fonte: Somar, INMET, 2008). A temperatura, porém, varia de forma significativa nas áreas menos urbanizadas, onde a média das mínimas de inverno cai para cerca dos 10°C a 5°C. A umidade relativa do ar é de aproximadamente 70%, podendo chegar aos 20% ou menos durante o inverno.

Para ter uma noção das tensões nos revestimentos cerâmicos em Brasília, é conveniente revisar o que diz a literatura clássica sobre o assunto. Segundo FIORITO (1994), para o cálculo do aumento de comprimento de uma barra de material homogêneo de seção “S” submetida a um acréscimo uniforme de temperatura “ Δt ”, como mostrado na Figura 3.17, pode-se usar a Equação 3.15.

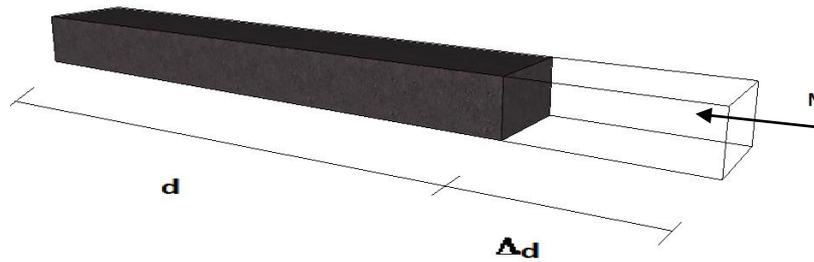


Figura 3.17 Barra sujeita a um efeito térmico (FIORITO, 1994).

$$\Delta d = \alpha \Delta t d \quad (3.15)$$

Onde:

Δd = Variação do comprimento “d”;

α = Coeficiente de dilatação térmica;

Δt = Variação da temperatura= (T2-T1);

d = Comprimento inicial.

Pode-se calcular a força axial para impedir o deslocamento “ Δd ” usando a Equação (3.16):

$$N = -ES \frac{\Delta d}{d} \quad (3.16)$$

Onde:

N = Esforço normal

E = Módulo de elasticidade do material;

S = Seção transversal da barra de material homogêneo.

Substituindo a equação (3.16) em (3.17), pode-se calcular a tensão de compressão a que a barra fica submetida:

$$\sigma = -\alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (3.17)$$

Aplicando-se as definições anteriores, pode-se dizer que as magnitudes das tensões térmicas que estão presentes neste sistema são dependentes do coeficiente de dilatação

térmica linear e do módulo de deformação (E) das diversas camadas, como também das condições de exposição ao meio ambiente, posto que a variação de temperatura (ΔT) entre as camadas produz deformações distintas dentre elas.

Existem diferentes estágios de dano ou deformação por fadiga em componentes onde defeitos podem resultar em uma seção inicial ileso e propagar de uma maneira estável até resultar em fraturas catastróficas. Para esta situação, pode-se estabelecer uma seqüência de danos por fadiga, classificando-a da seguinte forma:

- Mudanças na subestrutura e microestrutura que causam ampliação nos danos permanentes;
- Criação de fissuras microscópicas;
- O crescimento e a coalescência de defeitos microscópicos para formar fissuras resistentes que podem eventualmente inclinar para uma falha catastrófica;
- Propagação estável da macro-fissura dominante;
- Instabilidade estrutural ou fratura completa.

3.5.2 - O efeito da temperatura sobre os revestimentos

A Figura 3.18 mostra o efeito causado pela variação de temperatura na ligação entre o revestimento e a argamassa (FIORITO, 1994). Mostra-se uma variação de temperatura ΔT , uniforme nas duas camadas, a qual produzirá os deslocamentos do revestimento (ΔL_1) e da argamassa (ΔA_1). 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), (FIORITO, 1994).

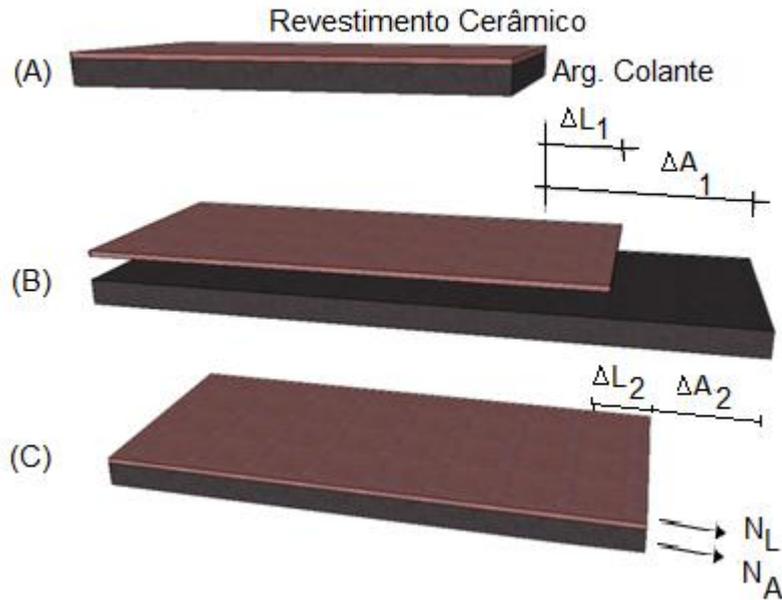


Figura 3.18 Variação da Temperatura.

Considerando:

S_L : seção do revestimento

E_L : módulo de elasticidade do revestimento

α_L : coeficiente de dilatação térmica linear do revestimento

S_A : seção da argamassa

E_A : módulo de elasticidade da argamassa

α_A : coeficiente de dilatação térmica linear da argamassa

A partir das equações (3.16) e (3.17), tem-se que os valores dos deslocamentos são:

$$\Delta L_1 = \alpha_L \cdot \Delta t \cdot d \quad (3.18)$$

$$\Delta A_1 = \alpha_A \cdot \Delta t \cdot d \quad (3.19)$$

$$\Delta L_2 = \frac{N_L}{E_L S_L} \cdot (d + \Delta L_1) \text{ na camada de revestimento} \quad (3.20)$$

$$\Delta A_2 = \frac{N_A}{E_A S_A} \cdot (d + \Delta A_1) \text{ na camada de argamassa} \quad (3.21)$$

A partir das condições

$$N_A + N_L = 0 \quad (3.22)$$

$$\Delta L_1 + \Delta L_2 = \Delta A_1 + \Delta A_2 \quad (3.23)$$

Com aproximação

$$(1 + \alpha_L \cdot \Delta t) = (1 + \alpha_A \cdot \Delta t) = 1 \quad (3.24)$$

Obtém-se

$$N_L = \frac{E_L \cdot S_L}{1 + \frac{E_L \cdot S_L}{E_A \cdot S_A}} \cdot (\alpha_A - \alpha_L) \cdot \Delta t \quad (3.25)$$

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:

$$\sigma_L = \frac{E_L}{1 + \frac{E_L e_L}{E_A e_A}} (\alpha_A - \alpha_L) \Delta t \quad (3.26)$$

$$\Sigma_A = \frac{N_A}{e_A}, \text{ sendo } N_A = -N_L \quad (3.27)$$

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.

3.5.3 - Teoria de Coulomb-Mohr

Esta teoria foi desenvolvida para representar as variações nos valores das componentes das quantidades tensoriais como os esforços à deformação. O critério de Coulomb- Mohr expressa a resistência ao corte ao longo de um plano num estado triaxial de tensões, obtendo-se a relação entre o esforço normal e de cisalhamento.

Para verificar-se se um determinado estado de tensão provoca ou não a ruptura do material se traça a envolvente de Mohr, verificando se a circunferência de Mohr das tensões principais máximas e mínimas intercepta ou não a curva, conforme apresentado na Figura 3.19:

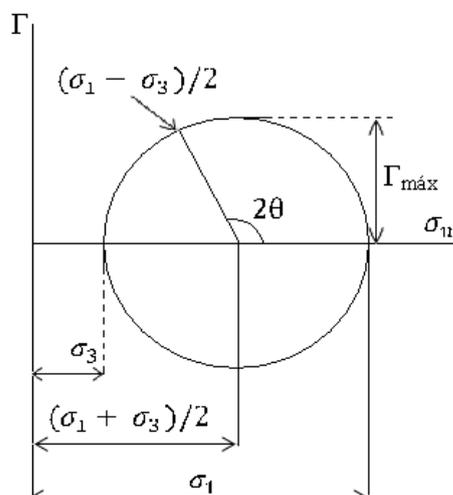


Figura 3.19 Representação Gráfica do Circulo de Mohr, (PORTILLO, 2008)

Onde:

σ_1 : esforço principal máximo,

σ_3 : esforço principal mínimo,

σ_2 : esforço intermediário e é considerado igual a σ_3 ,

$(\sigma_1 + \sigma_3)/2$: esforço médio,

$(\sigma_1 - \sigma_3)/2$: esforço desviatório.

É empregada em materiais que apresentam comportamentos diferentes se submetidos a tensões de tração e tensões de compressão, pode-se obter uma envolvente das circunferências de Mohr das tensões principais dos estados de tensão que provocam ruptura do material. Na Figura 3.20 apresenta essas envolventes assim, o círculo de Mohr de centro O_c representa a tensão máxima de compressão simples de valor σ_c , enquanto que o círculo de centro O_t indica a tensão máxima de tração simples σ_t .

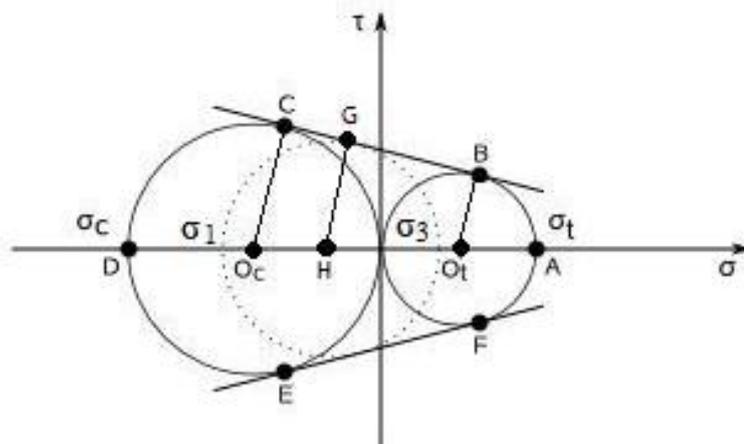


Figura 3.20 Círculo de Mohr para Tração e Compressão (CHAGAS, 2009)

Com os ensaios de tração e compressão uniaxiais do material podem-se traçar umas retas que servem pra fazer uma aproximação das envolventes de todas as circunferências do Círculo de Mohr, como é visto na Figura 3.20.

Baseado na Figura 3.20, quando o material está em ruptura, o estado de tensão representado pelas tensões extremas σ_1 e σ_3 é tangente à envolvente. Podemos relacionar as tensões de ruptura do material em compressão e tração uniaxiais (σ_c e σ_t) através das relações apresentadas a seguir:

$$\overline{O_cC} = \frac{\sigma_c}{2} - \frac{\sigma_t}{2} \quad (3.28)$$

$$\overline{HG} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_t}{2} \quad (3.29)$$

$$\overline{O_cO_t} = \frac{\sigma_c}{2} + \frac{\sigma_t}{2} \quad (3.30)$$

$$\overline{HO_t} = \frac{\sigma_t}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (3.31)$$

Na Figura 3.21 observa-se o critério de falha de Mohr para as tensões principais σ_1 e σ_2 representadas no plano.

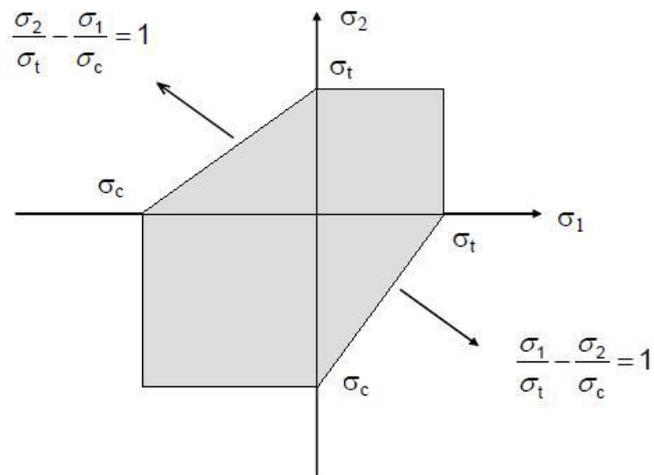


Figura 3.21 Representação Gráfica da teoria de Coulomb-Mohr para estado de tensão biaxial. (CHAGAS, 2009).

4. ESTUDO EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUÇÃO

Deve-se estudar o comportamento dos materiais que compõem o sistema de revestimento para conhecer as diferentes solicitações e reações às quais tais materiais estão submetidos. Para se realizar o estudo destes materiais tem-se o modelo numérico em Elementos Finitos para o conhecimento das tensões e deformações atuantes no sistema de revestimento quando sob choque térmico e, posteriores avaliações de resistência à fadiga focada na argamassa colante. Para isso faz-se indispensável saber as propriedades físicas e mecânicas necessárias para o modelo numérico e também, o conhecimento da curva S-N ou de Wölher para Argamassa Colante ACII.

Por estas razões neste capítulo são caracterizadas as propriedades mecânicas da argamassa colante ACII do sistema de revestimento e apresenta-se a metodologia para os ensaios à fadiga da argamassa colante para obtenção da curva S-N.

4.2 ENSAIOS ESTÁTICOS NA ARGAMASSA

A argamassa utilizada nesta pesquisa foi a Argamassa “Votomassa” Colante Exterior ACII de acordo com a Figura 4.1. Produzida de acordo com a Norma (NBR 13281:2005) e constituindo um material amplamente utilizado devido a sua flexibilidade e alta aderência, leve e de fácil uso de forma, permite múltiplas aplicações tanto em áreas internas como externas sobre alvenaria estrutural. Este material segundo o especificado na embalagem possui resistência à compressão de até 5 MPa.

A argamassa utilizada foi de acordo com a relação de 10 kg da argamassa para 2.2 litros de água, conforme especificação do fabricante (rótulo da embalagem) da argamassa. A mistura foi homogeneizada com uma furadeira acoplada a um misturador, com tempo de mistura de 2 (dois) minutos, com intervalo de 15 minutos para descanso e depois 1 (um) minuto de mistura final, de acordo com a especificação do fabricante.



Figura 4.1 Argamassa utilizada nos ensaios.

4.2.1 - Propriedades e características da argamassa

As propriedades físico-mecânicas da argamassa que compõem o sistema de revestimento cerâmico de fachadas devem cumprir os requisitos estabelecidos pela norma NBR 13281:2005, sendo classificadas conforme as características e propriedades que apresentam determinadas pelos métodos de ensaio, que são:

- Ensaios de caracterização da argamassa colante: cone de penetração, módulo de elasticidade, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.

4.2.1.1 - Determinação da Consistência à deformação da Argamassa através do Cone de Penetração

A consistência da argamassa foi determinada através da resistência de penetração de um cone metálico de massa padronizada. Baseou-se como referência, na realização desse ensaio, a norma BS 1377/75 – Cone Penetrometer Method (BSI, 1975), os procedimentos realizados para este ensaio são:

- Preenchimento do recipiente cilíndrico com argamassa se fez em três camadas, aplicando-se 20 golpes em cada camada até a borda do recipiente;
- Acabamento da superfície da argamassa com o auxílio de uma espátula;

- Posicionamento do cone rente à superfície da argamassa, efetuando-se a leitura inicial;
- Liberação do cone para que este penetre na argamassa, realizando-se a leitura final.

O índice de consistência da argamassa ensaiada corresponde à diferença entre a leitura inicial e a leitura final, expressa em centímetros “cm”. As leituras obtidas mostrassem na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 Consistência da Argamassa Colante

Amostra	Leitura (cm)
1	0,50
2	0,53
3	0,52
4	0,54
5	0,49
6	0,52
7	0,53
8	0,50
9	0,54
10	0,53
11	0,53
12	0,51

Na Figura 4.2 pode-se observar o procedimento feito para o ensaio de penetração de cone.



Figura 4.2 Ensaio de penetração de cone.

4.2.1.2 - Confeção dos Corpos de prova

Para o preparo da mistura da argamassa seguimos os requisitos da norma ABNT (NBR 13276:2002) para argamassa colante. Os corpos de prova foram moldados em formas cilíndricas com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, e moldes contendo quatro compartimentos, de forma a possibilitar a preparação simultânea de quatro corpos de prova com seção transversal de 40 mm x 40 mm e 160 mm de comprimento. Logo após o término das moldagens, os corpos de prova foram cobertos com pano molhado para evitar a perda de água e, depois de um dia, foram desmoldados e levados para câmara úmida durante 28 dias.



Figura 4.3 Corpos de Prova para o ensaio de resistência a Compressão.

4.2.1.3 – Determinação da Resistência à Tração na Flexão

Neste ensaio foram usados corpos de prova (CP) com a mistura da argamassa segundo os requisitos da Norma (NBR 13276:2002). Moldando-se os corpos de prova em moldes de quatro compartimentos, para assim permitir a preparação simultânea de oito corpos de prova, com seção transversal de 40 mm x 40 mm e 160 mm de comprimento. Para evitar a perda de água, depois após o término das moldagens, os corpos de prova foram cobertos com panos úmidos, durante 28 dias ficaram mantidos à temperatura ambiente em uma câmara úmida. Após este tempo foram desmoldados para o ensaio de resistência à tração na flexão.

O ensaio consiste em aplicar uma carga centrada sobre o corpo de prova bi apoiado, rompendo-o à flexão, como é mostrado na Figura 4.4 e Figura 4.5. A resistência à tração na flexão é determinada através da Equação 4.1.

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

Onde:

R_f = Resistência à tração na flexão (MPa)

F_f = Carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em Newtons;

L = Distância entre os suportes, em milímetros.

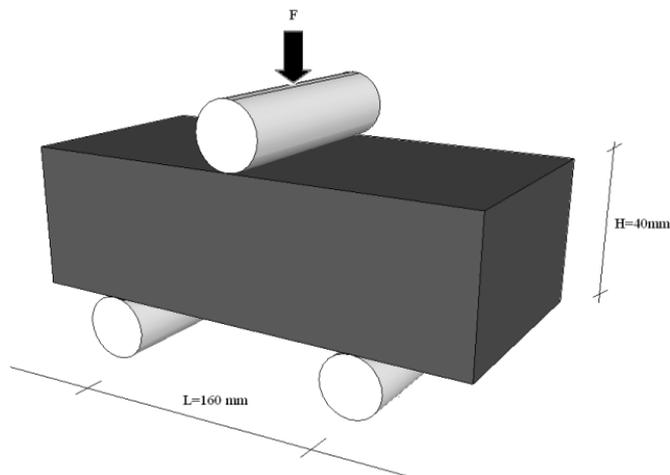


Figura 4.4 Diagrama de carga para determinação da resistência à tração na flexão.



Figura 4.5 Equipamento e Corpo de Prova.

Na Tabela 4.2, mostram-se os resultados dos ensaios de resistência da argamassa à tração na flexão, obtendo-se uma média de $F_{tk} = 3,50$ MPa.

Tabela 4.2 Resistência da argamassa à tração na flexão

CP	Resistência à Tração na Flexão (MPa)
1	3,38
2	3,84
3	3,49
4	3,05
5	3,77
6	3,49
MÉDIA	3,50

4.2.1.4 – Determinação da Resistência à Compressão

O ensaio de resistência à compressão foi feito seguindo as especificações da Norma (NBR 13279: 2005), utilizando-se metades extraídas dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração na flexão. A norma disse para “utilizar as metades dos três corpos de prova de ensaio de flexão, posicionando-as no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio, tal que a face rasada não fique em contato com o dispositivo de apoio nem com o dispositivo de carga”, como é mostrado na Figura 4.6. A determinação da resistência à compressão é calculada através da Equação 4.2.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4.2)$$

Onde:

R_c = Resistência à compressão, em MPa;

F_c = Carga máxima aplicada, em N;

1600= É a área da seção considerada quadrada do dispositivo de carga 40mmx 40mm, mm^2 .

Os resultados obtidos nos ensaios para a determinação da resistência à tração são apresentados na Tabela 4.3, encontrando-se uma média de $F_{ck} = 10,51$ MPa para a Argamassa colante ACII.



Figura 4.6 Corpo de prova rompido à tração na flexão utilizado no ensaio à compressão.

Tabela 4.3 - Resistência à Compressão

CP	CARGA (kgf)	F_{ck} (MPa)
1	1760	11,00
1	1743	10,89
2	1641	10,26
2	1680	10,50
3	1674	10,46
3	1666	10,41
4	1627	10,17
4	1629	10,18
5	1617	10,11
5	1654	10,34
6	1775	11,09
6	1706	10,66
MÉDIA		10,51

4.2.1.5 – Ensaio para determinação do módulo de deformação

Para a determinação do módulo de deformação da argamassa foi adaptado à norma (NBR 13279:2005) do concreto. Essa norma estabelece os métodos para determinação dos módulos estáticos e de deformação à flexo-compressão, do concreto endurecido, em corpos de prova cilíndricos que podem ser moldados ou extraídos da estrutura, e estabelece como traçar o diagrama tensão-deformação.

Foi utilizado para o ensaio 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 50 mm.

Para o ensaio de determinação do módulo de elasticidade foi utilizado uma prensa manual de CBR (Ensaio de capacidade de suporte), aplicando carga de intervalo de 100kgf, atingido essa força é feita a leitura com o extensômetro para medir as deformações do corpo-de-prova. Na Figura 4.7 pode-se observar um diagrama a modo de exemplo de umas das leituras obtidas no ensaio.

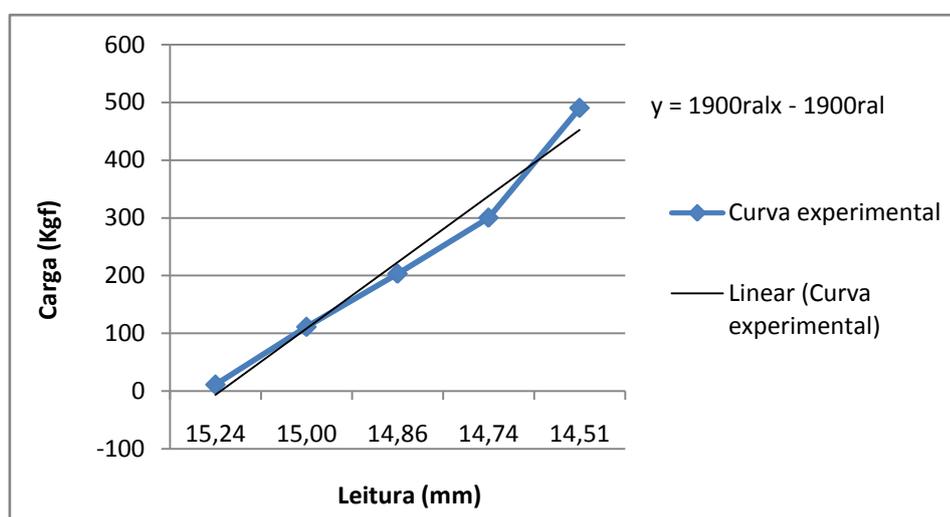


Figura 4.7 Diagrama Carga versus Deformação, característico de ensaio de um corpo de prova para a determinação do módulo de deformação da argamassa.

Na Tabela 4.4 apresentam-se os resultados do módulo de deformação obtidos para a Argamassa ACII, encontrando-se uma média de MD=2.97 GPa.

Tabela 4.4 Módulo de Deformação a Flexão ACII

MODULO DE DEFORMAÇÃO A FLEXÃO ACII	
CP	MD (GPa)
1	2,76
2	2,94
3	3,24
4	1,58
5	3,30
6	4,01
Valor Médio	2,97

4.3 ENSAIOS À FADIGA NA ARGAMASSA

Este ensaio consiste em aplicar uma carga cíclica de tração em um corpo-de-prova apropriado e padronizado, para se obter a Curva de Wölher ou Curva S-N. O ensaio de fadiga também pode prover dados quantitativos relativos às características de um material, por um longo período de tempo, sem se romper, usando cargas repetitivas ou cíclicas, tendo como resultados do ensaio:

- Limite de resistência à fadiga (σ_{Rf});
- Resistência à fadiga (σ_f);
- Vida em fadiga (N_f).

4.3.1 - Equipamento usado

Para o teste de resistência à fadiga, foi utilizado o equipamento MTS 810, mostrado na Figura 4.8, que propicia uma ampla capacidade de teste, para vários tipos de corpos de prova. Esta é controlada por um computador, e através deste é que se ativa a bomba e o atuador hidráulico, para que se efetue o teste. As garras de fixação dos corpos de prova também são acionadas hidráulicamente, de maneira que se pode variar a pressão nas mesmas, utilizando um controlador na base da própria máquina. Esta ainda possui uma célula de carga, que mede a força aplicada aos corpos de prova, em uma faixa de 1KN a 100KN.



Figura 4.8 Equipamento MTS 810, Material Test System.

4.3.2 - Dimensionamento do Corpo de prova

Para os ensaios da Fadiga à compressão, foram escolhidos os corpos de prova cilíndricos 10x20cm segundo o estudo feito por Chagas (2009). O procedimento da moldagem foi realizado tendo como referência os procedimentos da NBR 5738:2003, adotando-se as seguintes etapas:

- Nas faces internas dos moldes cilíndricos aplicou-se uma fina camada de óleo mineral;
- Misturou-se duas vezes a argamassa para se garantir a sua uniformidade;
- Os moldes cilíndricos foram preenchidos com argamassa, empregando-se para isso três camadas, na última delas coloca-se uma quantidade em excesso para que ao ser adensada a argamassa preencha todo o volumem do molde;
- Para garantir a homogeneidade, se faz um adensamento manual com a aplicação de 12 golpes em cada camada, deve-se atentar para que a primeira camada seja atravessada em toda a sua espessura, evitando-se golpear a base do molde, já na segunda camada a haste deve atravessar aproximadamente 20 mm da camada anterior.

Os corpos de prova foram moldados com argamassa colante em fôrmas metálicas, colocando-se 3 camadas de argamassa com 4 cm cada uma, e dando 25 golpes pra adensá-la com o soquete metálico. Depois de moldados, os corpos de prova foram cobertos com panos úmidos, para com isso impedir a perda da água por evaporação. Após passadas 48 horas, eles foram desmoldados e armazenados para cura em câmara úmida. Aos 28 dias foram retirados da câmara e colocados para secagem ao ar livre por um período de 24 horas.

Na Figura 4.9 pode-se observar a mistura da argamassa com água, utilizando-se para isso um misturador mecânico. Para não ter perda de água durante o processo de mistura da argamassa, faz-se uso de uns panos úmidos como é mostrado na Figura 4.10.



Figura 4.9 Mistura da argamassa



Figura 4.10 Pano úmido, para evitar a perda da água.

Na Figura 4.11 observa-se o mecanismo de apoio usado no ensaio experimental para os corpos cilíndricos submetidos à fadiga sob compressão.

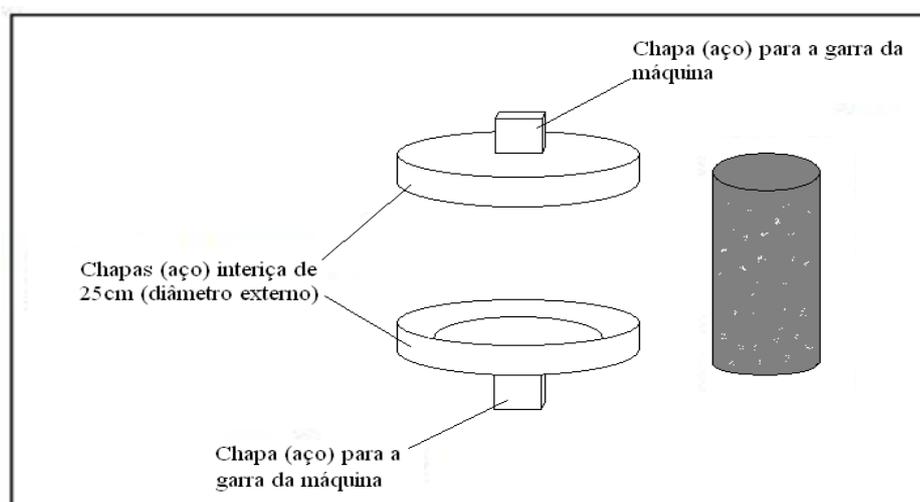


Figura 4.11 Mecanismo de apoio para o ensaio de corpos-de-prova cilíndricos, submetidos à fadiga sob compressão.

Depois de moldados em formas metálicas, os corpos de prova foram cobertos com panos úmidos para impedir com isso a perda de água, sendo mantidos nas condições do laboratório (temperatura = ± 2 °C e umidade = $60 \pm 5\%$).

Eles foram mantidos em câmara úmida por um período aproximadamente de 6 meses, após de uma cura inicial em que eram mantidos 48 horas em moldes, foram identificados e passaram a ser armazenados.

Na Figura 4.12 se apresentam um exemplo de um corpo de prova utilizado para o ensaio de fadiga à compressão.



Figura 4.12 Corpos de Prova da argamassa colante para o ensaio de fadiga a compressão.

O primeiro corpo de prova foi ensaiado com 80% da carga de ruptura à compressão, ou seja, com 86,03 kN, esteve na máquina sendo testado durante 4 dias e alcançando 5,37 ciclos sem romper à fadiga. Chegou-se a pensar que a argamassa não ia entrar no estado de fadiga, para conferir isso se fizeram mais dois testes com a porcentagem igual ao do primeiro corpo de prova, os quais apresentam como resultado a ruptura deles numa ciclagem de 263956 na meia. E uma ruptura de forma longitudinal no centro do corpo de prova, como se pode ser observado na Figura 4.13 (b).



Figura 4.13 (a) Ensaio de Fadiga à Compressão, (b) Corpos de prova ensaiados à Fadiga a compressão com ruptura longitudinal na parte central.

A ruptura apresentada nos corpos de prova se apresentou longitudinalmente na parte interna, a qual segundo FUSCO (2008), é o modo verdadeiro de ruptura, com fraturas em planos paralelos ao campo de compressão, com tendência ao esboroamento da estrutura interna do material.

Nos ensaios a compressão, surge também um falso modo de ruptura, como é mostrado na Figura 4.14, sendo conseqüência do confinamento provocado pelo atrito dos topos do corpo de prova como os pratos da prensa de ensaio.

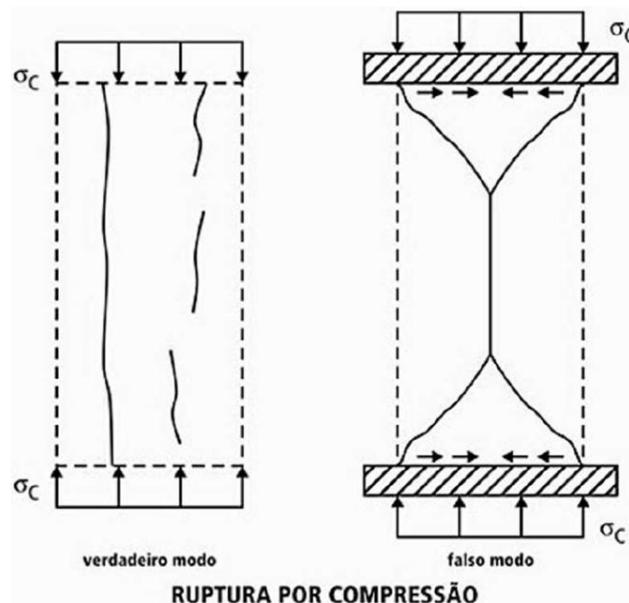


Figura 4.14 Ruptura à compressão de concretos de baixa ou média resistência $f_{ck} < 40$ Mpa. (Tecnologia do Concreto Estrutural).

É importante ter esclarecido que nem todas as porções da argamassa fabricada têm, porém, exatamente a mesma resistência. Esta resistência vai depender dos materiais empregados, das condições da mistura e das condições de transporte, lançamento, adensamento e cura. Portanto a resistência da argamassa é uma propriedade que pode variar para cada lote fabricado.

Na Figura 4.15 acima, pode se observar um corpo de prova ensaiado de fadiga à compressão, onde se amostra ele já fraturado, apresentando-se a fratura na metade do corpo de prova, como era esperado.



Figura 4.15 Corpos de prova fraturados.

4.4 CURVAS S-N PARA A ARGAMASSA COLANTE

Para se determinar a capacidade dos corpos de prova em resistir a um conjunto de esforços repetitivos de compressão, se adotou a metodologia exposta por Cervo (2004) sobre o paralelismo entre curvas do concreto à fadiga em ensaios à compressão e à tração. Com os dados dos ensaios experimentais encontra-se a curva de Wöhler para a argamassa colante sob compressão, após, pelo paralelismo das curvas entre compressão e tração, acha-se, também, a curva de Wöhler para a argamassa colante à tração.

O ensaio foi feito alternando-se o valor da carga cada vez, até levar o corpo de prova à ruptura ou a interrupção do teste. O teste a fadiga à compressão é caracterizado por um

carregamento senoidal, tendo uma amplitude S e razão entre tensão mínima e máxima de zero, ou seja, coeficiente $R=0$ devido ao $\sigma_{min} = 0$.

Na Tabela 4.5 se resume os valores dos níveis de tensão alternada e os valores de forças nas garras do equipamento. Os ensaios foram feitos com uma frequência de 3 ciclos por segundo, e pode-se observar que os ensaios com um maior valor de tensão rompem com um número menor de ciclos.

Tabela 4.5 Resistência à Fadiga a Compressão

CP	Força (KN)	Tensão (Mpa)	Número de ciclos (N)	Log N
1	86,04	11,17	236848	5,37
2	67,34	8,57	271581	5,43
3	67,34	8,57	283439	5,45
4	39,76	5,06	1051637	6,02
5	39,76	5,06	1086048	6,03
6	39,76	5,06	1092080	6,03
7	39,76	5,06	1051637	6,02

De acordo com os ensaios e os resultados obtidos, será considerado 5.06 MPa como o valor da resistência à fadiga da argamassa colante à compressão. Com isto um corpo de prova sob tensão alternada a compressão abaixo deste limite de resistência à fadiga, pode suportar um número de ciclos maior que 10^7 ciclos.

Tendo-se os dados da resistência de fadiga à compressão da argamassa colante, e fazendo uso do coeficiente $\eta = f_{ck}/f_{tk}$, onde os valores de $f_{tk} = 3,50$ MPa e $f_{ck} = 10,51$ MPa são encontrados na Tabela 4.2 e Tabela 4.3 respectivamente e sendo η o fator usado para fazer a correção dos valores para a tensão de tração da argamassa colante, pode-se obter o limite de fadiga a tração da argamassa colante.

Então o coeficiente $\eta = 10,51/3,50 = 3,00$, podendo-se construir a Tabela 4.6, a seguir:

Tabela 4.6 Pontos de ensaio de fadiga da argamassa colante sob compressão e sob tração

Tensão de Compressão (MPa)	Fator	Correção para Tensão de Tração (MPa)
11,17	/3,00	3,72
8,57	/3,00	2,86
8,57	/3,00	2,86
8,57	/3,00	2,86
5,06	/3,00	1,69
5,06	/3,00	1,69
5,06	/3,00	1,69
5,06	/3,00	1,69

Os valores da tensão à tração foram obtidos dividindo-se o valor da tensão de compressão encontrados experimentalmente, pelo fator $\eta = 3,00$ calculado acima, encontrando-se assim o valor limite de fadiga para a tração de 1,69 MPa, como pode-se observar na Tabela 4.6.

Com os dados obtidos na Tabela 4.5 e Tabela 4.6 construiu-se a Figura 4.16 e Figura 4.17, correspondentes as Curvas S-N de fadiga e linearizada respectivamente, onde se pode observar que os valores para a resistência à compressão são maiores dos obtidos para a resistência a tração, tem se indicados os limites à fadiga para os três tipos de tensões atuantes na argamassa colante.

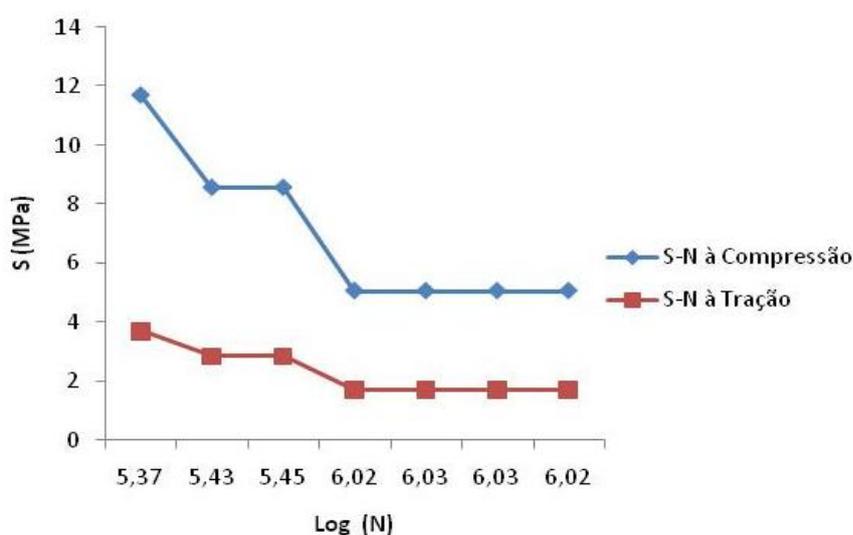


Figura 4.16 Curva S-N de Fadiga.

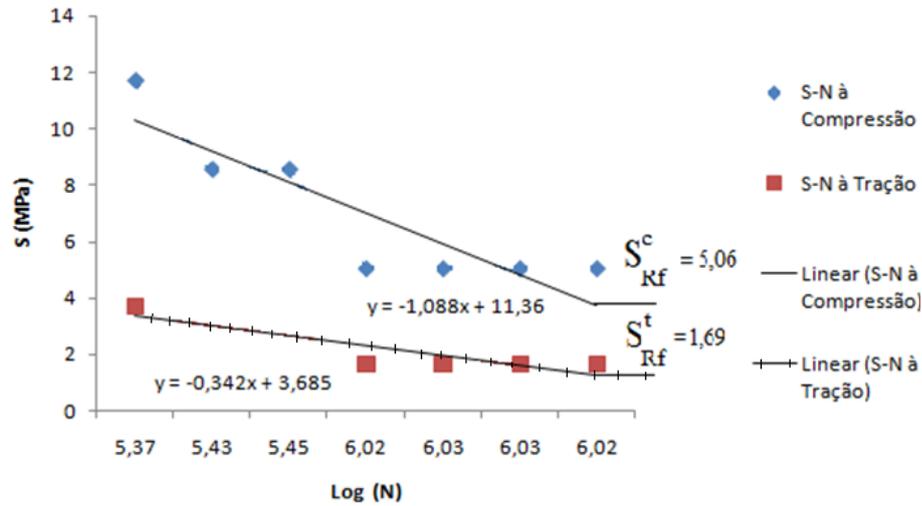


Figura 4.17 Curva S-N linearizada

Utilizando as equações citadas por CERVO (2004) e desenvolvidas por TEPFERS E KUTTI (1979), para a fadiga da argamassa colante ACII, substituindo-se nas equações da Figura 4.17 “y” por “S” e “x” por “Log (N)”, e na Equação 3.20, $R=0$ (posto que no ensaio $\sigma_{\min} = 0$), tem-se:

- Para a Argamassa Colante sob compressão

$$\text{Para } N < 10^{6,02} \quad S = 11,36 - 1,088 \log(N)$$

$$\text{Para } N > 10^{6,02} \quad S = 5,06 \text{MPa} \quad (4.4)$$

- Para a Argamassa Colante sob tração

$$\text{Para } N < 10^7 \quad S = 3,685 - 0,342 \log(N)$$

$$\text{Para } N > 10^7 \quad S = 1,69 \text{MPa} \quad (4.5)$$

Definidos os valores das tensões máxima e mínima que poderão suportar a argamassa colante ACII, pode-se fazer as curvas de ruptura para avaliação da fadiga, Tendo definidos os valores de $f_{ck}=10,51$ MPa e $f_{tk}=3,50$ MPa estáticos, e as curvas de fadiga para a redução de $f_{ck}=5,06$ MPa e $f_{tk}= 1,69$ MPa com o número de ciclos. Na Figura 4.18 se mostram as curvas supostas para $N=1$ e para $N=10^{6,02}$, neste último valor corresponde ao número de ciclos referente à tensão de resistência.

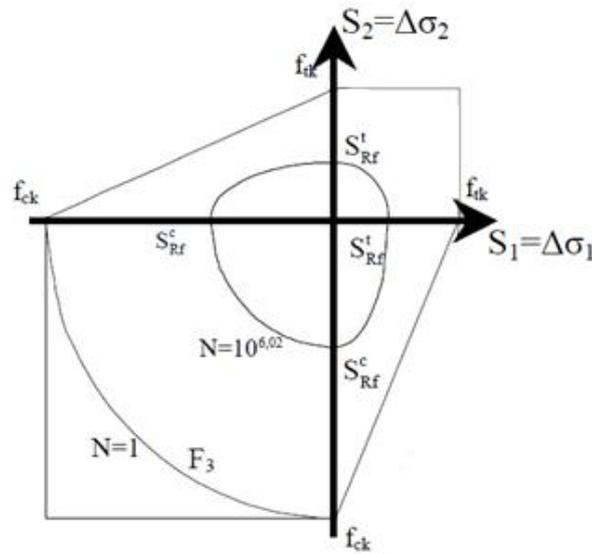


Figura 4.18 Curvas de ruptura para avaliação da fadiga.

A Figura 4.18 pode-se entender da seguinte maneira:

$N=1$ significa o ciclo número 1 onde se apresentam as resistências à compressão e tração que podem atuar na argamassa colante ACII nesse ciclo, e sendo $N= 10^{6,02}$ o ciclo no qual a argamassa vai romper por fadiga, atingindo um valor de tensão à compressão e tração iguais aos encontrados na Equação 4.4 e Equação 4.5. Se as tensões atuantes na argamassa colantes ACII não ultrapassam os valores das equações anteriormente mencionadas não haverá risco de ruptura por fadiga.

5. ESTUDO NUMÉRICO

5.1 INTRODUÇÃO

Para se analisar o estado de tensão e deformação existente no sistema de revestimento composto por argamassa de emboço, argamassa colante, peças cerâmicas e o material de rejunte, trabalhou-se com o modelo em elementos finitos, no qual foram consideradas as propriedades dos materiais do sistema de revestimento propostas por Saraiva (1998), onde neste trabalho foi feita a avaliação no estado estático e nesta pesquisa a avaliação faz-se quando o sistema de revestimento esta sob choque-térmico e à fadiga a compressão.

A diferença de temperatura entre a superfície externa da fachada e a superfície interna do prédio gera diferentes tensões termomecânicas entre os diversos materiais das camadas do sistema de revestimento, e para simular as solicitações térmicas considerou-se a temperatura do dia mais quente ocorrido na cidade de Brasília, o qual foi no ano de 1975, conforme INMET (2012). Os valores das temperaturas obtidos utilizando este carregamento térmico atuando sobre o sistema de revestimento são aplicados ao modelo numérico adotado para a análise das tensões.

Utiliza-se o método de elementos finitos (MEF), com o software ANSYS, realizou-se uma modelagem numérica de uma fachada típica e do corpo de prova utilizado nos ensaios de fadiga à compressão.

5.2 MODELO NUMÉRICO

Para o estudo em elementos finitos, considerou-se a hipótese simplificadora de estado plano de deformação proposto por SARAIVA (1998), onde as direções dos eixos do sistema de revestimento da fachada iniciais são giradas tal como se mostra na Figura 5.1, onde o eixo “y” está a espessura do modelo na horizontal, termina no modelo numérico na vertical.

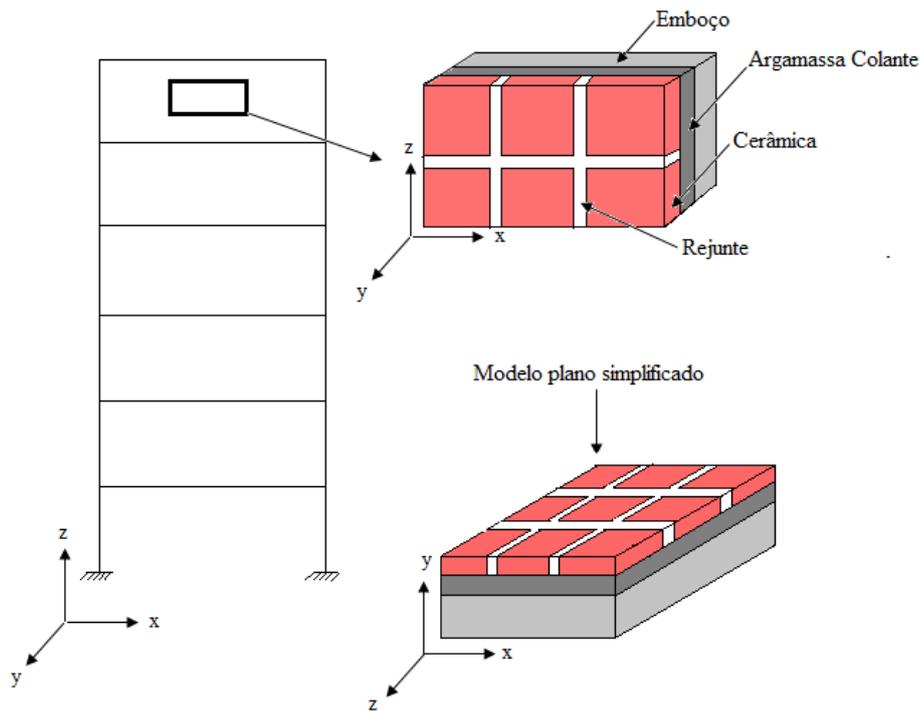


Figura 5.1 Hipótese simplificadora de estado plano

Na Figura 5.2 observa-se o modelo com as dimensões sugeridas por Saraiva (1998).

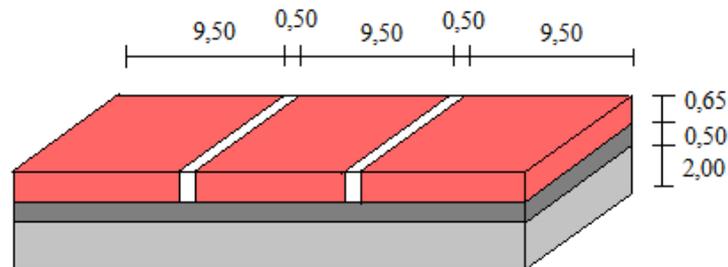


Figura 5.2 Dimensões típicas e adotadas no modelo do sistema de revestimento em cm.

Para a elaboração dos modelos numéricos foi utilizado o elemento SOLID65 disponível na biblioteca do ANSYS para a análise das tensões atuantes na argamassa colante e para a análise das tensões e deformações à fadiga à compressão foi usado o elemento PLANE42 o qual tem dois graus de liberdade por nó, já para a análise do choque térmico foi utilizado o PLANE55 que tem oito nós e três graus de liberdade por nó, As Figuras 5.3 e Figura 5.4 apresentam a geometria dos elementos SOLID65, PLANE55 e PLANE42.

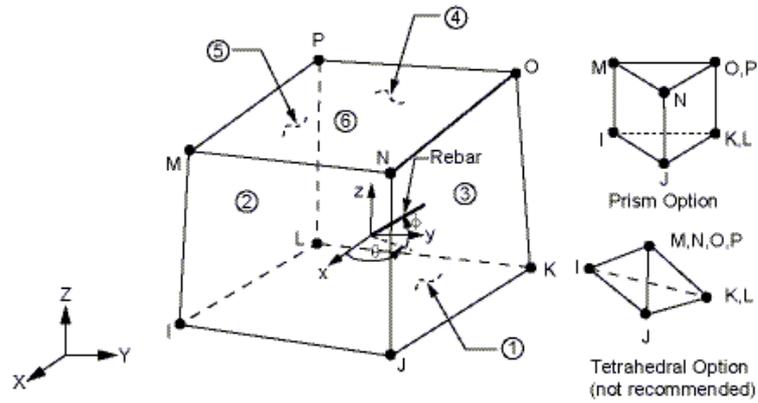


Figura 5.3 Geometria do elemento SOLID65 do ANSYS.

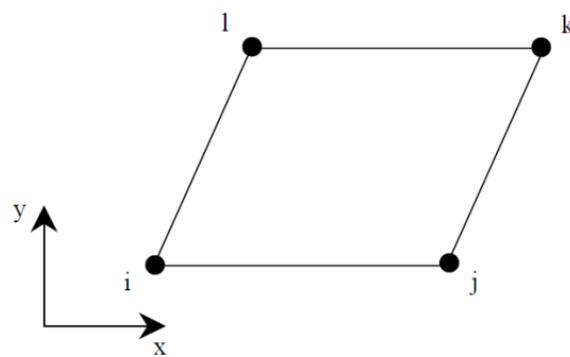


Figura 5.4 Geometria do elemento PLANE55 e PLANE 42 do ANSYS.

Nas Tabelas 5.1, Tabela 5.2 e Tabela 5.3 são apresentadas as propriedades requeridas para o elemento SOLID65, PLANE55 e PLANE42 utilizados para a análise termomecânica e térmica do modelo numérico referente ao sistema de revestimento.

Tabela 5.1 Resumo de entrada para o elemento SOLID65.

PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÃO
Nome Completo	SOLID65
Nós (8Nós)	I, J, K, L, M, N, O, P
Graus de Liberdade	UX, UY, UZ
Constantes Reais	MAT1, VR1, THETA1, PHI1, MAT2, VR2, THETA2, PHI2, MAT3, VR3, THETA3, PHI3, CSTIF
Propriedades do Material	Módulo de Elasticidade EX, EY, EZ
	DENS= PRXY ou NUXY, densidade
	POISSON ALPX, ALPY, ALPZ

Tabela 5.2 Resumo de entrada para o elemento PLANE55.

PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÃO
Nome Completo	PLANE55
Nós	I, J, K e L
Graus de Liberdade por Nó	Temperaturas T em cada nó
Constantes Reais	Nenhuma
Propriedades do Material	Condutividade térmica: KKK
	DENS= densidade
	Calor específico: C
Carregamento Usado	Temperatura imposta
Opção de Análise	Keyopt(3)=0 (estado plano)

Tabela 5.3 Resumo de entrada para o elemento PLANE42

PROPRIEDADES	ESPECIFICAÇÃO
Nome Completo	PLANE42
Nós	I, J, K e L
Graus de Liberdade por Nó	Translações UX e UY
Propriedades do Material	Módulos de deformação: EX, EY
	Coeficiente de Poisson: NUXY
	Coeficiente de dilatação térmica: ALPX e ALPY
Carregamento Usado	Temperatura nos nós T(I), T(J), T(K) e T(L)
Opção de Análise	Keyopt (3)=2 (estado plano de deformação)

5.2.1 - Análise das tensões na Argamassa Colante

Para investigar as tensões atuantes na argamassa colante causadas por cargas térmicas à compressão, usou-se o modelo em elementos finitos com análise linear, fez-se sua discretização geométrica como é mostrada na Figura 5.5 com dimensões de 10 cm x 20 cm. O modelo conta com aproximadamente 2304 nós e 2873 elementos do tipo Sólido (SOLID65 da biblioteca do ANSYS) respectivamente. A Tabela 5.4 apresenta um resumo das propriedades que foram usadas para os elementos SOLID65.

Tabela 5.4 Propriedades atribuídas ao elemento SOLID65.

Argamassa Colante	Valores
Coefficiente de Poisson (NUXY)	0,2
Coefficiente de Dilatação Térmica (ALPX em °C-1)	$8,7 \times 10^{-6}$
Condutividade térmica (KXX em w/m °C)	0,84

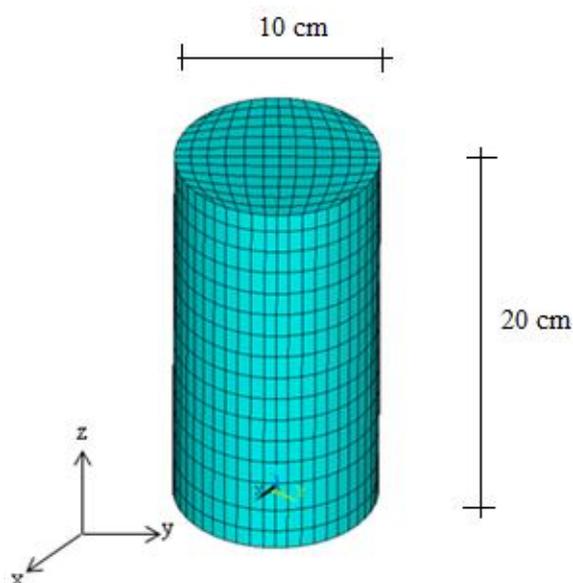


Figura 5.5 Discretização do Corpo de Prova utilizado no ensaio à Fadiga a compressão.

Para obter as tensões do modelo mostrado na Figura 5.5, trabalhou-se com as cargas à compressão usada no ensaio experimental para a análise à fadiga. Optou-se por se fazer uma modelagem estática, onde se teve em conta as propriedades da argamassa colante, e foram simuladas as condições de contorno do ensaio, tal que o modelo esteve-se livre na parte de cima, aplicando-se aí as cargas à compressão e evitando a movimentação na parte de baixo nas direções, x , y e z , como é mostrado na Figura 5.6. O objetivo desta modelagem é se comparar as tensões obtidas nos ensaios experimentais com as obtidas usando o programa ANSYS, e assim, conferir se o procedimento feito no laboratório foi desenvolvido da maneira correta e, além disso, explicar o porquê da ruptura dos corpos de prova na parte interna.

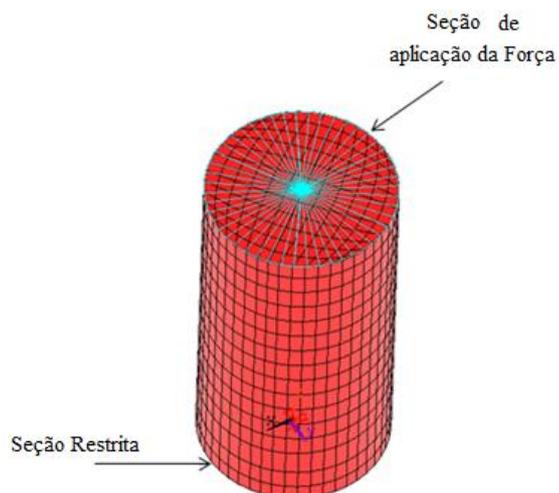


Figura 5.6 Aplicação de cargas e engaste do Modelo.

Na Tabela 5.5, mostram-se as cargas usadas nos ensaios experimentais, as quais foram empregadas na modelagem no programa ANSYS.

Tabela 5.5 Dados usados para a modelagem.

Cargas usadas no ANSYS	
Carga1 (N/m ²)	86068,03
Carga2 (N/m ²)	66038,96
Carga3 (N/m ²)	38991,24

Obteve-se as tensões nos nós presentes ao longo da vertical no centróide do modelo, para um total de 17 nós, apresentados na Tabela 5.6 a seguir.

Tabela 5.6 Tensões Obtidas no Corpo de Prova modelado à Compressão.

Nós	467	482	481	480	479	478	477	476	
Tensões 1 (MPa)	10,95	10,95	10,95	10,95	10,96	10,96	10,96	10,95	
Tensões 2 (MPa)	8,41	8,40	8,41	8,40	8,40	8,40	8,41	8,40	
Tensões 3 (MPa)	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,96	4,97	4,96	
Nós	475	474	473	472	471	470	469	468	290
Tensões 1 (MPa)	10,95	10,93	10,89	10,81	10,66	10,55	10,41	11,17	14,65
Tensões 2 (MPa)	8,41	8,38	8,36	8,29	8,18	8,07	7,92	8,57	11,24
Tensões 3 (MPa)	4,96	4,95	4,94	4,89	4,83	4,76	4,67	5,06	6,63

Pode-se observar nas tensões a compressão expostas na Tabela 5.6 e na média calculada para elas na Tabela 5.7, que os valores obtidos são aproximados com os conseguidos no ensaio experimental de fadiga a compressão expostos na Tabela 4.3 de 11,17 MPa, 8,57 MPa e de 5,06 MPa, para as mesmas cargas usadas no ANSYS.

Tabela 5.7 Médias das tensões atuantes nos nós

Média	(MPa)
Tensões 1	11,09
Tensões2	8,92
Tensões 3	5,26

Obtiveram-se também as tensões de compressão atuando longitudinalmente ao longo do eixo z), na borda e a 2,3 cm da borda do corpo de prova, usando a carga maior entre as três mencionadas na Tabela 5.5, ou seja, a carga-1 de $86068,03 \text{ N/m}^2$, para comparar, com as tensões à compressão exposta na Tabela 5.6 para a carga-1.

- Tensões à compressão presentes na borda:

Tensão Máxima = 11,17 MPa

Tensão Mínima = 10,41 MPa

- Tensões à compressão presentes a 2,3cm da borda:

Tensão Máxima = 13,40 MPa

Tensão Mínima = 10,33 MPa

Observa-se que as tensões de compressão atuantes nesta parte, têm valores menores que às obtidas na parte central do corpo de prova que são as expostas na Tabela 5.6, sendo que para a carga-1 a máxima tensão foi de 14,65 MPa e a mínima tensão de 10,41 MPa, podendo-se concluir que as tensões aumentam a medida que as mesmas se aproximam na parte central do corpo de prova, o que de acordo com a NBR 8953:1992, acontece nos ensaios a compressão, e nem sempre há sinais visíveis de fratura externa, no entanto, as fissuras internas terão atingido um estado avançado tal que o corpo de prova não suporta mais uma carga maior, e por isso causa a ruptura do corpo de prova na parte interna.

5.2.2 - Modelo de Fachada para a Análise Térmica

O modelo em elementos finitos desenvolvido para a análise térmica e termomecânica são expostas na Figura 5.7 e Figura 5.8, mostrando-se a malha dos modelos que estão compostas por 8832 elementos e 9035 nós para a análise térmica e 2208 elementos e 4197 nós para a análise termomecânica. O modelo em elementos finitos utilizado foi definido na pesquisa de SARAIVA (1998), estes apresentam o esquema de uma fachada de revestimento cerâmico de um prédio.

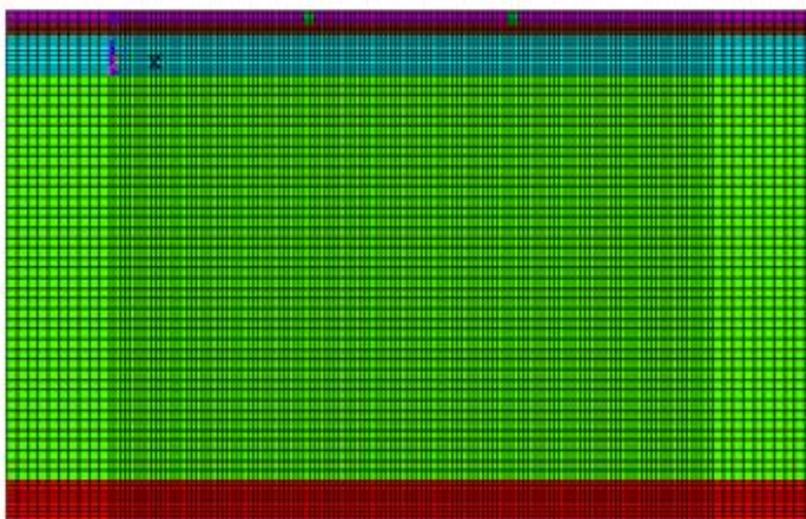


Figura 5.7 Modelo numérico em elementos finitos para análise térmica.



Figura 5.8 Modelo numérico em elementos finitos para análise termo-mecânica

As propriedades dos materiais utilizadas na análise mecânica: coeficiente de Poisson, 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, módulo de elasticidade da argamassa colante, rejunte e cerâmica, serão utilizados a partir das pesquisas conduzidas de SARAIVA (1998). Tabela 5.8 e Tabela 5.9 apresentam um resumo das propriedades que foram usadas para os elementos PLANE55 e PLANE42.

Tabela 5.8 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 5.9 Propriedades atribuídas ao elemento PLANE42.

Material	Módulo de Elasticidade (EX em GPa)	Coefficiente 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

A Figura 5.9 apresenta um zoom na vista do modelo numérico, detalhando os elementos que simularão cada camada do sistema de revestimento.

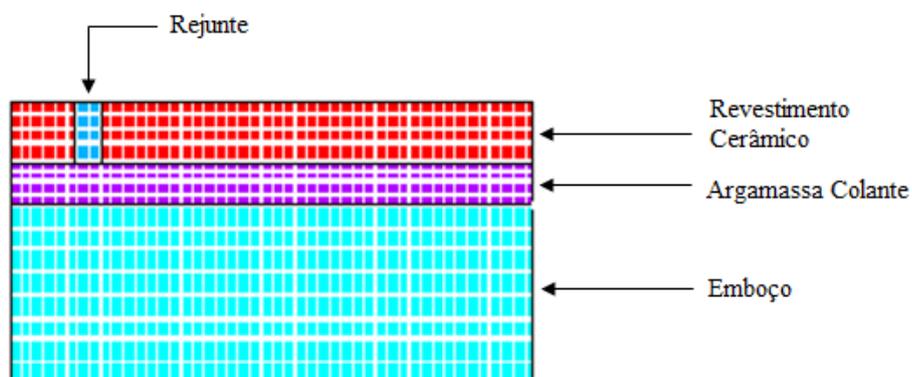


Figura 5.9 Elementos finitos que simulam os componentes de uma fachada.

5.2.3 - Condições de Contorno para o modelo como fachada

É preciso se definir as condições de contorno dos modelos usados na análise numérica, já que elas têm influência na precisão da modelagem numérica do sistema de revestimento. SARAIVA (1998) definiu umas condições de contorno conservadoras, sem ficar longe da realidade, considerou um sistema de revestimento apoiado sobre um substrato rígido, ficando as direções “x” e “y” com deformações nulas. Como no modelo trabalha-se com uma única seção de uma fachada, precisou-se de uma seção equivalente ao restante da fachada e para isso tomou-se uma região de 5 cm como é mostrado na Figura 5.10. Observa-se que, as propriedades equivalentes levam em conta o tamanho da região.

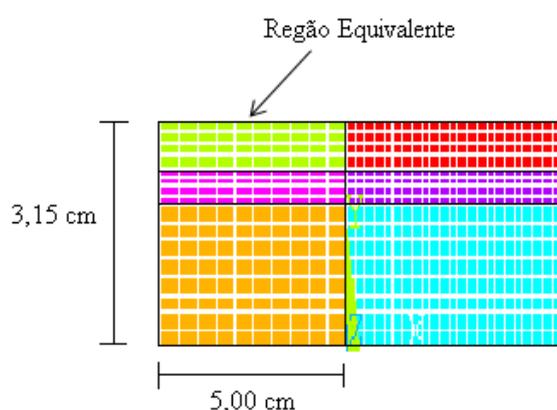


Figura 5.10 Modelo com fachada equivalente de 5 cm em cada lado.

5.2.4 - Cálculo da Fachada Equivalente

Busca-se com a fachada equivalente uma representação que tenha um comportamento similar ao restante da fachada, quanto a sua rigidez, esforços e deformações. Ao trabalhar-se como uma longitude em “x” e “y” de 5 cm e manteve-se a espessura do modelo de 3,15cm; precisa-se que definir propriedades diferentes para estas duas direções (x,y). Com isso, as propriedades dos materiais das camadas vão ter valores diferenciados segundo as direções. O módulo de elasticidade e o coeficiente de dilatação térmica equivalentes de cada elemento usados nesta pesquisa foram tomados segundo os cálculos feitos por UCHÔA (2007).

5.2.4.1 - Módulo de Elasticidade Equivalente

Utilizou-se a Lei de Hooke no cálculo do módulo de elasticidade equivalente da argamassa colante e do emboço, representada pela Equação 5.1.

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

Onde,

σ = Tensão;

ε = Deformação;

E = Módulo de Elasticidade;

Δl = Variação comprimento que o restante da fachada está submetido ao ser solicitado;

L_0 = o l Comprimento inicial da fachada.

Temos também que a tensão é dada por:

$$\sigma = \frac{E \Delta L}{L_0} \quad (5.2)$$

Ao considerar uma fachada equivalente na nossa estrutura, temos que levar a conta que as tensões e as deformações têm que ser iguais ao sistema de revestimento principal, portanto

$$\sigma_F = \sigma_{Eq}.$$

Eliminando Δl e utilizando as tensões e as deformações anteriores para o Módulo de Elasticidade Equivalente E_{Eq} vamos ter:

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

Onde, E_F = Módulo de elasticidade da fachada real, L_{Eq} = comprimento da fachada equivalente, L_F = comprimento do restante da fachada.

Usamos os valores definidos na Tabela 5.6 com $E_{\text{Arg.Colante}} = 3562,0 \text{ MPa}$ e $E_{\text{Emboço}} = 5499,0 \text{ MPa}$, tendo para $L_F = 490,0 - 29,5 = 460,5 \text{ cm}$, podemos calcular o módulo de elasticidade para o emboço e para a argamassa colante:

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

Para o cálculo do Módulo de elasticidade equivalente da cerâmica e rejunte pode-se usar a seguinte equação:

$$\Delta L = \sigma L_0 / E \quad (5.4)$$

No cálculo do deslocamento de toda a fachada na camada de cerâmica mais rejunte podemos usar a soma da dilatação dos dois materiais juntos:

$$\Delta L = \Delta L_{\text{Rejunte}} + \Delta L_{\text{Cerâmica}} \quad (5.5)$$

Podem-se somar também os comprimentos do rejunte e da cerâmica para assim encontrar o comprimento inicial desta camada:

$$L_0 = L_{0/\text{Rejunte}} + L_{0/\text{Cerâmica}} \quad (5.6)$$

Utilizando as Equações 5.5 e 5.6 para encontrar o deslocamento da camada Rejunte mais Cerâmica na Equação 5.4 obtemos:

$$\Delta L = \frac{\sigma(L_{0/\text{Rejunte}}) + \sigma(L_{0/\text{Cerâmica}})}{E_{\text{Rejunte}} + E_{\text{Cerâmica}}} \quad (5.7)$$

Ou também;

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

Fazendo uma igualdade entre a Equação 5.7 e a Equação 5.8 temos:

$$\frac{L}{E_{\text{Rejunte}+\text{Cerâmica}}} = \frac{L_0/\text{Rejunte}}{E_{\text{Rejunte}}(L_0/\text{Rejunte}+L_0/\text{Cerâmica})} + \frac{L_0/\text{Cerâmica}}{E_{\text{Cerâmica}}(L_0/\text{Cerâmica}+L_0/\text{Rejunte})} \quad (5.9)$$

Com o anterior já calculado podemos obter o módulo de elasticidade equivalente para a camada de cerâmica mais o rejunte da seguinte maneira:

$$E_{\text{Rejunte}+\text{Cerâmica}} = \frac{E_{\text{Rejunte}}E_{\text{Cerâmica}}(L_0/\text{Rejunte}+L_0/\text{Cerâmica})}{L_0/\text{Rejunte}E_{\text{Cerâmica}}+L_0/\text{Cerâmica}E_{\text{Rejunte}}} \quad (5.10)$$

Temos os seguintes valores para o cálculo do Módulo de Elasticidade da cerâmica mais o rejunte, $L_0/\text{Rejunte} = 2 \times 0,50 = 1,00 \text{ cm}$; $L_0/\text{Cerâmica} = 3 \times 9,50 = 28,50 \text{ cm}$ e com $E_{\text{Cerâmica}} = 41600,00 \text{ MPa}$ e $E_{\text{Rejunte}} = 7879,00 \text{ MPa}$

Portanto vamos obter:

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

Como já falamos anteriormente as condições para a fachada completa e a fachada equivalente tem que ser iguais, com isso está-se dizendo que as tensões nas duas faixas também são, portanto, $\sigma_F = \sigma_{Eq}$.

Usando a Equação 5.3 tem-se:

$$E_{Eq} \frac{\Delta L}{L_F} = E_{Eq/\text{Rejunte}+\text{cerâmica}} \frac{\Delta L}{L_{Eq/\text{Rejunte}+\text{cerâmica}}} \quad (5.11)$$

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

Como o valor de $E_F = E_{\text{Rejunte}+\text{Cerâmica}}$, então $E_F = 36329,34 \text{ MPa}$

E o valor de L_F e $L_{Eq/\text{Rejunte}+\text{cerâmica}}$ calcula-se da seguinte forma:

$$L_F = 490 - (3 \times 9,5 + 2 \times 0,5) = 460,50 \text{ cm}$$

$$L_{\text{Eq/ Rejunte +cerâmica}} = 5,0 \times 2 = 10,0 \text{ cm}$$

Utilizando os valores anteriormente calculados obtemos da Equação 5.12 o valor para o Módulo equivalente do rejunte mais a cerâmica:

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

Apresenta-se na Tabela 5.10 os valores dos módulos de elasticidade equivalentes para a região de 5cm usada no modelo numérico, para representar toda a fachada.

Tabela 5.10 Módulo de Elasticidade Equivalente

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

5.2.4.2 - Coeficiente de Dilatação Térmica Equivalente

Para calcular o Coeficiente de dilatação linear equivalente para a Argamassa Colante e o Emboço podemos usar a seguinte equação:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta t \quad (5.13)$$

Onde: ΔL = variação do comprimento; α = Coeficiente de dilatação térmica linear; l_0 = Comprimento inicial; e ΔT = Variação de temperatura.

Tanto na fachada real como na fachada equivalente os deslocamentos devem ser iguais para a mesma variação temperatura, portanto:

$$\Delta L_{Eq} = \Delta L_F \quad (5.14)$$

Onde, a variação do comprimento da fachada equivalente esta dada por ΔL_{Eq} e a Variação do comprimento da fachada real por ΔL_F , fazendo substituição na Equação 5.15 com a Equação 5.14 obtemos:

$$\alpha_{Eq} \cdot L_{Eq} \cdot \Delta t = \alpha_F \cdot L_F \cdot \Delta t \quad (5.15)$$

Com isso pode-se encontrar a equação para o cálculo do Coeficiente de dilatação térmica equivalente:

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

E usando os valores anteriormente calculados, $\alpha_{Emboço} = 11,5 \times 10^{-6} / ^\circ C$ e $\alpha_{Arg.Colante} = 8,7 \times 10^{-6} / ^\circ C$, $L_F = 460,50 \text{cm}$ e $L_{Eq/Rejunte+Cerâmica} = 10,0 \text{cm}$. Obtemos:

$$\alpha_{Eq/Emboço} = 0,00053 / ^\circ C \quad \text{e} \quad \alpha_{\frac{Eq}{Arg}Colante} = 0,00040 / ^\circ C$$

Já para o calculo do coeficiente de dilatação térmica linear equivalente da cerâmica e do rejunte se considerou o seguinte:

Usando-se a Equação 5.5:

$$\Delta L = \Delta L_{Rejunte} + \Delta L_{Cerâmica}$$

$$\Delta L = (L_{Cerâmico} + L_{Cerâmico}) \alpha_{Cerâmica+Rejunte} \cdot \Delta t \quad (5.17)$$

$$\Delta L = L_{Cerâmico} \cdot \alpha_{Cerâmica} \cdot \Delta t + L_{Rejunte} \cdot \alpha_{Rejunte} \cdot \Delta t \quad (5.18)$$

$$\alpha_{\text{Cerâmica+Rejunte}} = \frac{L_{\text{Cerâmico}} \cdot \alpha_{\text{Cerâmica}} + L_{\text{Rejunte}} \cdot \alpha_{\text{Rejunte}}}{L_{\text{Cerâmico}} + L_{\text{Rejunte}}} \quad (5.19)$$

E os valores das propriedades impostas ao elemento PLANE42 da Tabela 5.6:

$\alpha_{\text{Cerâmica}} = 6,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; $\alpha_{\text{Rejunte}} = 4,2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; $L_{\text{Cerâmica}} = 3 \times 9,50 = 28,50 \text{ cm}$ e $L_{\text{Rejunte}} = 2 \times 0,50 = 1,00 \text{ cm}$, com isso obtém-se:

$$\alpha_{\text{Cerâmica+Rejunte}} = 6,71 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \quad (5.20)$$

Para o cálculo do coeficiente de dilatação térmica para a fachada equivalente temos:

$$\alpha_{\text{Eq/Cerâmica+Rejunte}} = \alpha_{\text{Cerâmica+Rejunte}} \frac{L_{\text{F}}}{L_{\text{Eq}}} \quad (5.21)$$

Obtendo o valor de:

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

Os valores para o coeficiente de dilatação térmica linear são apresentados na Tabela 5.11 a seguir:

Tabela 5.11 Coeficientes de Dilatação Térmica Linear

Material	Coeficiente de Dilatação Térmica Linear Equivalente ($^{\circ}\text{C}$)
Emboço	0,11941
Arg. Colante	0,07735
Rejunte + Cerâmica	0,78891

6. ANÁLISE DO CHOQUE TÉRMICO, TÉRMOMECÂNICO E DE FADIGA

As cargas externas não são as únicas fontes de tensões e deformações de uma estrutura. Outras fontes incluem efeitos térmicos que surgem de diferentes temperaturas, essas variações produzem expansão ou contração de materiais estruturais, neste caso no sistema de revestimento cerâmico, resultando em deformações e tensões térmicas. Neste capítulo se faz a análise dessas tensões atuando na argamassa colante.

6.1 ANÁLISE DO CHOQUE TÉRMICO

Para estudar as tensões devido ao choque térmico no sistema de revestimento, trabalhou-se com um transiente que gera tensões flutuantes e cíclicas, as quais podem levar os materiais ao colapso por fadiga, sem ter necessariamente estes materiais no limite da resistência.

Para se obter as temperaturas a serem usadas no modelo com o qual se estudou as tensões geradas no sistema de revestimento, foi considerada as condições climáticas da cidade de Brasília as quais foram expostas no Capítulo 3, trabalhando nesta pesquisa com uma temperatura máxima de $34,6^{\circ}\text{C}$, e uma mínima de 21°C . Além dessas temperaturas também foram calculadas as temperaturas com as quais vamos gerar o choque térmico no sistema de revestimento, a temperatura superficial externa (t_e) tanto para cerâmica clara assim como também para a cerâmica escura.

Foi usada a variação da radiação solar incidente (I_g) mais crítica que foi no sentido oeste (W) às 16 horas, apresentada na pesquisa de FROTA E SHIFFER (2003) apud UCHÔA (2007), exposta na Tabela 6.1. Foram escolhidos estes dados devido a altitude da incidência solar para esses dados que é de $\Theta = 17^{\circ}\text{S}$, a qual aproxima-se à altitude da cidade de Brasília que é de $\Theta = 15^{\circ} 47'\text{S}$.

Também foi considerado um coeficiente de absorção térmica (α) para cada tipo de cerâmica, clara e escura, sugeridos por THOMAZ (1989), apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 Valores de Radiação Solar Incidente (I_g).

Hora	I_g (W/m ²)	Hora	I_g (W/m ²)
00:00	0	12:00	68
01:00	0	13:00	224
02:00	0	14:00	536
03:00	0	15:00	680
04:00	0	16:00	692
05:00	0	17:00	457
06:00	0	18:00	23
07:00	30	19:00	0
08:00	45	20:00	0
09:00	53	21:00	0
10:00	60	22:00	0
11:00	65	23:00	0

Tabela 6.2 Coeficiente de absorção térmica

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

Trabalhou-se também com o valor da condutância superficial exterior da parede (h_e), igual a 18W/m²°C, o qual foi calculado pela média aritmética dos valores de “ h_e ” referentes aos cinco tipos de ventos, segundo FROTA E SCHIFFER (2003; apud UCHÔA, 2007), apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 Variação da condutância térmica superficial externa (h_e)

Tipo de Vento	Velocidade do Vento (m/s)	h_e (W/m ² °C)
Ar calmo	0,10	8
Velocidade muito fraca	0,50	10
Velocidade fraca	1,00	13
Velocidade média	3,00	21
Velocidade forte	9,00	35

Tendo os dados suficientes, pode-se calcular a temperatura superficial externa (t_e) do revestimento para os dois tipos de cerâmica, a clara e a escura.

$$te_{Clara} = T_e + \frac{0,45 I_g}{25} \quad (6.1)$$

$$te_{Escura} = T_e + \frac{0,95 I_g}{25} \quad (6.2)$$

Substituindo os valores expostos nas tabelas fazemos o cálculo da temperatura superficial externa, sendo T_e a temperatura máxima se apresentada na cidade de Brasília.

$$te_{Clara} = 34,6 + \frac{0,45 \cdot 692}{25} = 47,05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$te_{Escura} = 34,6 + \frac{0,95 \cdot 692}{25} = 60,89 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Depois de calcular as temperaturas superficiais externas e tomando a temperatura interna (T_i), com um valor de $T_i = 18^\circ\text{C}$ a mesma adotada por UCHÔA (2007), para assim ter uns resultados de referência e conferir que esta se fazendo os procedimentos da maneira certa, passamos a calcular as temperaturas internas do sistema de revestimento mostradas na Figura 6.1, usando para isso os seguintes valores de condutibilidade térmica, ingressados no ANSYS. Representadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 Coeficiente de Condutibilidade Térmica usada no programa ANSYS.

Material	K (Kcal/m.°C.h)
Emboço	1,204
Argamassa colante	0,722
Cerâmica	1,72
Bloco	1,00

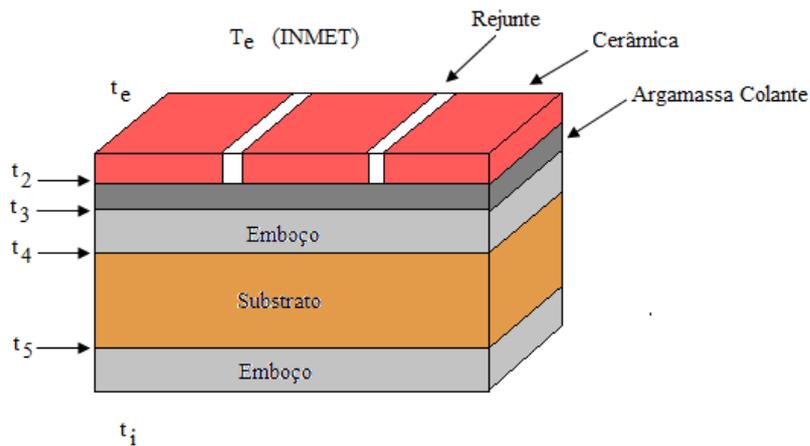


Figura 6.1 Temperaturas do sistema de Revestimento a serem calculadas no programa ANSYS

Ao ingressar os dados anteriores no programa ANSYS e trabalhando-se com o elemento PLANE55, se faz uma análise do choque térmico atuando no sistema de revestimento durante duas horas, as quais foram divididas cada meia hora para assim se saber a temperatura nas camadas no início é dizer aos 0,001seg, à meia hora 1800seg, na primeira hora 3600seg, na hora e meia 5400seg e finalmente o que acontecia às duas horas 7200seg. Nos gráficos de 6.1 a 6.11 podem-se observar as temperaturas obtidas no programa ANSYS tanto para cerâmica clara como também para a cerâmica escura.

- Nas Figuras 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 pode-se observar a distribuição da Temperatura no sistema de revestimento com Cerâmica Clara durante o tempo de duas horas,

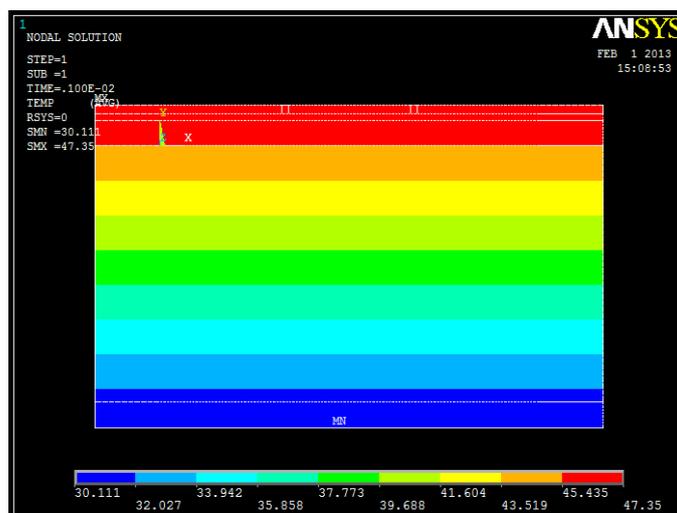


Figura 6.2 Choque térmico aos 0,001seg, Cerâmica Clara.

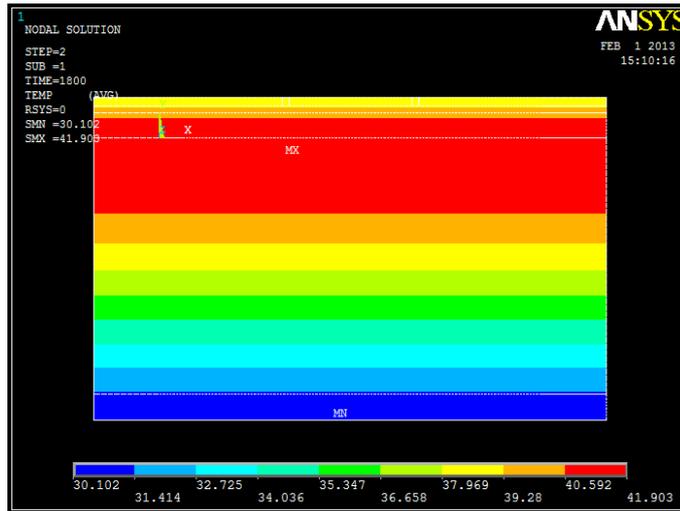


Figura 6.3 Choque térmico aos 1800seg, Cerâmica Clara.

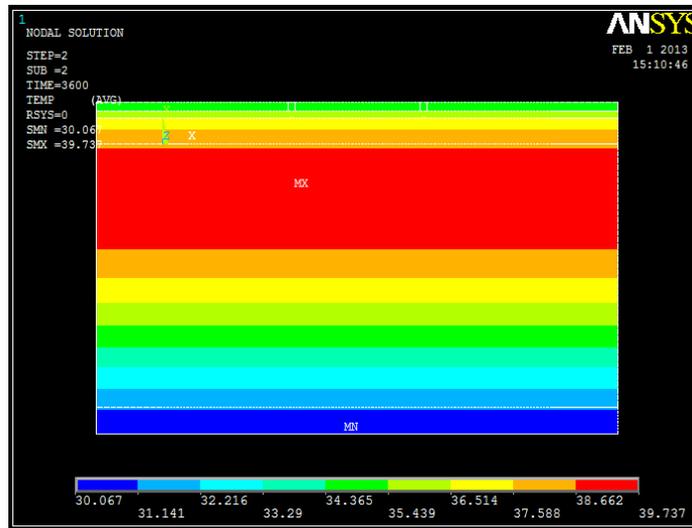


Figura 6.4 Choque térmico aos 3600seg, Cerâmica Clara.

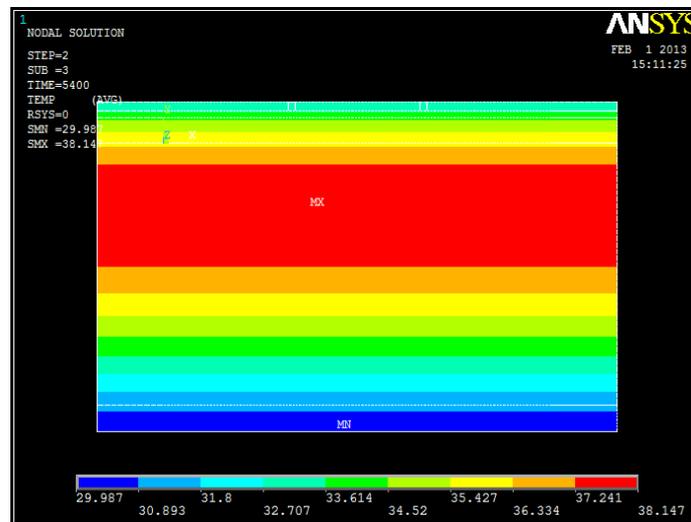


Figura 6.5 Choque térmico aos 5400seg, Cerâmica Clara.

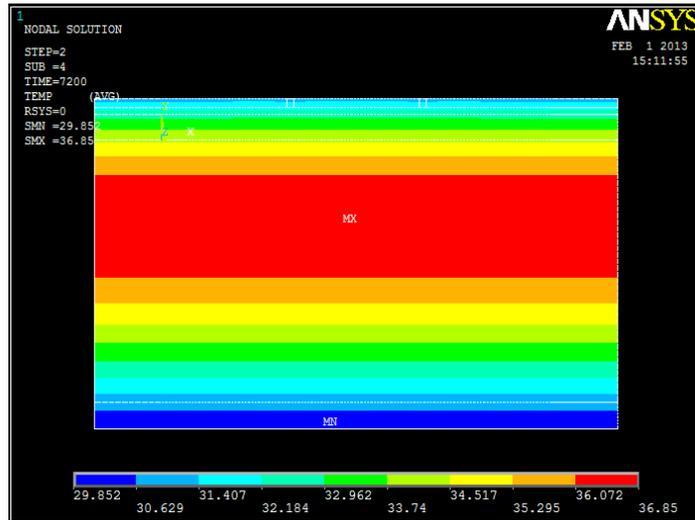


Figura 6.6 Choque térmico aos 7200seg, Cerâmica Clara.

- Nas Figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 pode-se observar a distribuição da Temperatura no sistema de revestimento com Cerâmica Escura durante o tempo de duas horas:

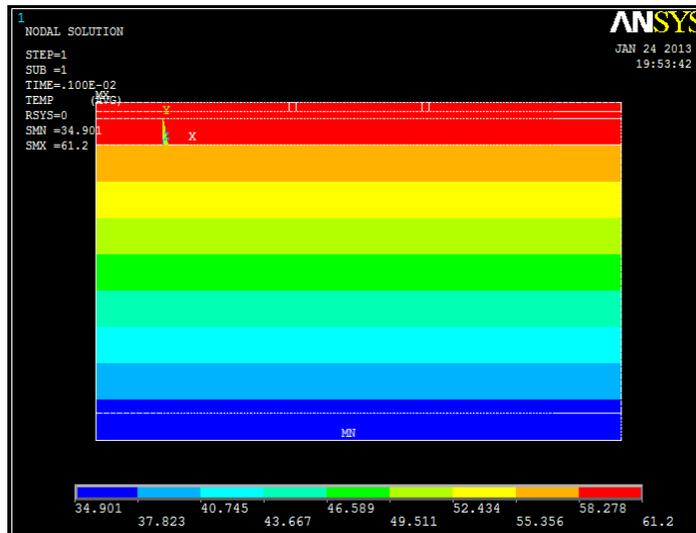


Figura 6.7 Choque térmico aos 0,001seg, Cerâmica Escura.

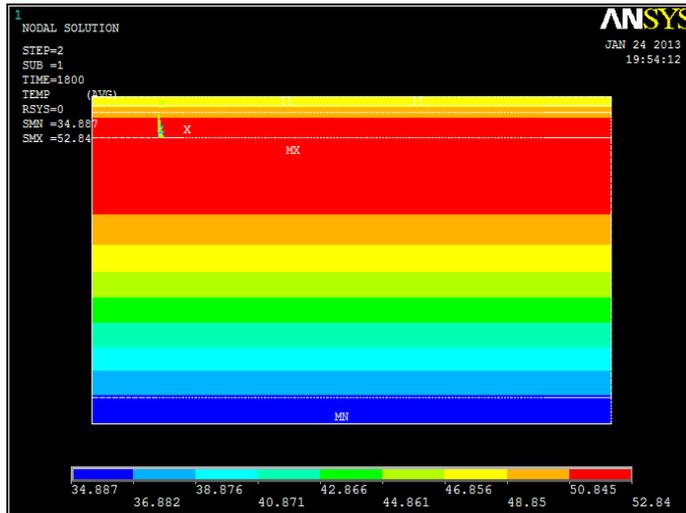


Figura 6.8 Choque térmico aos 1800seg, Cerâmica Escura.

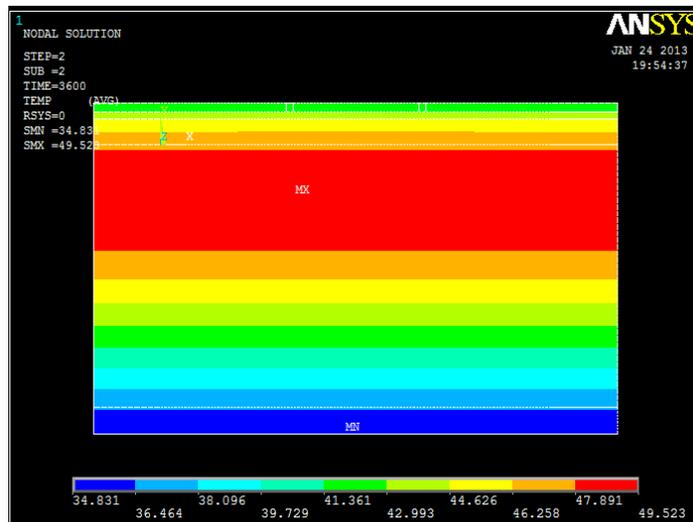


Figura 6.9 Choque térmico aos 3600seg, Cerâmica Escura.

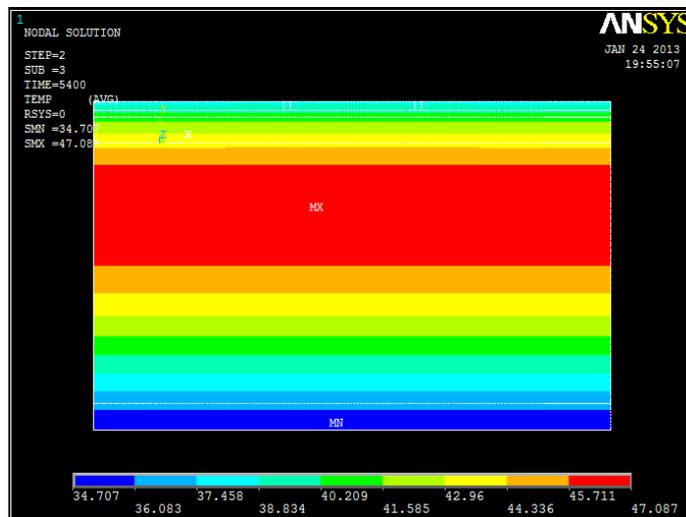


Figura 6.10 Choque térmico aos 5400seg, Cerâmica Escura.

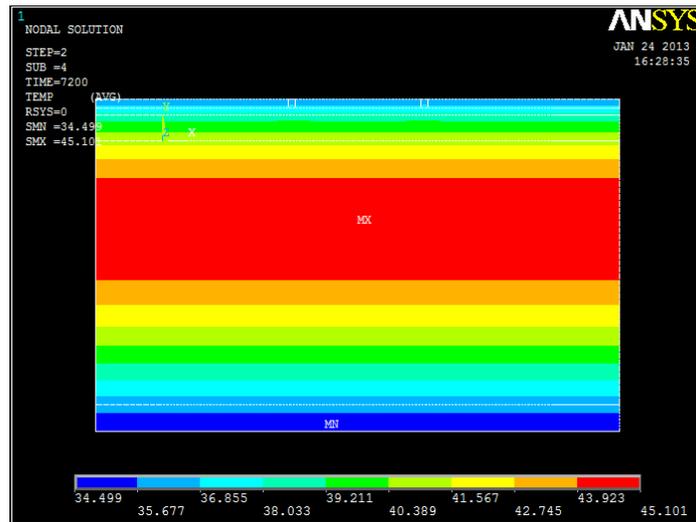


Figura 6.11 Choque térmico aos 7200seg, Cerâmica Escura.

Pode-se observar desde a Figura 6.2 até a Figura 6.6 para o sistema de revestimento com cerâmica clara e desde a Figura 6.7 até a Figura 6.11 para o sistema de revestimento com cerâmica escura, que as temperaturas para os dois tipos de sistemas de revestimento cerâmico que os comportamentos das temperaturas são similares, já que se observa como as temperaturas iniciam na camada da cerâmica e o rejunte, com temperaturas altas ao tempo dos 0,001seg e ao passar do tempo aos 7200seg, esse calor é transmitido para as camadas mais inferiores, ficando concentrado para o caso das duas horas as temperaturas altas na camada de alvenaria, e assim as peças cerâmicas e o rejunte com temperaturas baixas devido ao choque térmico.

Com os dados obtidos no programa ANSYS, consegue-se conhecer as temperaturas nas interfaces das camadas do revestimento, ver Figura 6.1, no sistema com Cerâmica Clara e Cerâmica Escura, as quais são amostradas na Tabela 6.5 e na Tabela 6.6 respectivamente.

Tabela 6.5 Temperaturas nas Interfaces das Camadas para Cerâmica Clara

Tempo seg.	Temperaturas °C					
	te	t2	t3	t4	t5	ti
0,001	47,35	47,04	46,58	45,42	31,28	30,11
1800	37,98	39,02	40,11	41,61	31,62	30,10
3600	34,59	35,48	36,54	38,44	31,57	30,07
5400	32,56	33,31	34,25	36,10	31,46	29,99
7200	31,13	31,78	32,62	34,33	31,49	29,85

Tabela 6.6 Temperaturas nas Interfaces das Camadas para Cerâmica Escura

Tempo (seg)	Temperaturas °C					
	te	t2	t3	t4	t5	ti
0,001	61,20	60,73	60,03	58,25	37,23	34,90
1800	46,71	48,32	50,02	52,37	37,21	34,89
3600	41,48	42,85	44,51	47,46	37,13	34,83
5400	38,34	39,51	40,97	43,85	36,96	34,71
7200	36,13	37,14	38,44	41,12	36,69	34,50

Mostra-se a distribuição das temperaturas para a Cerâmica Clara e Cerâmica Escura nos pontos apresentados na Tabela 6.5 e Tabela 6.6, na Figura 6.12 e Figura 6.13 respectivamente.

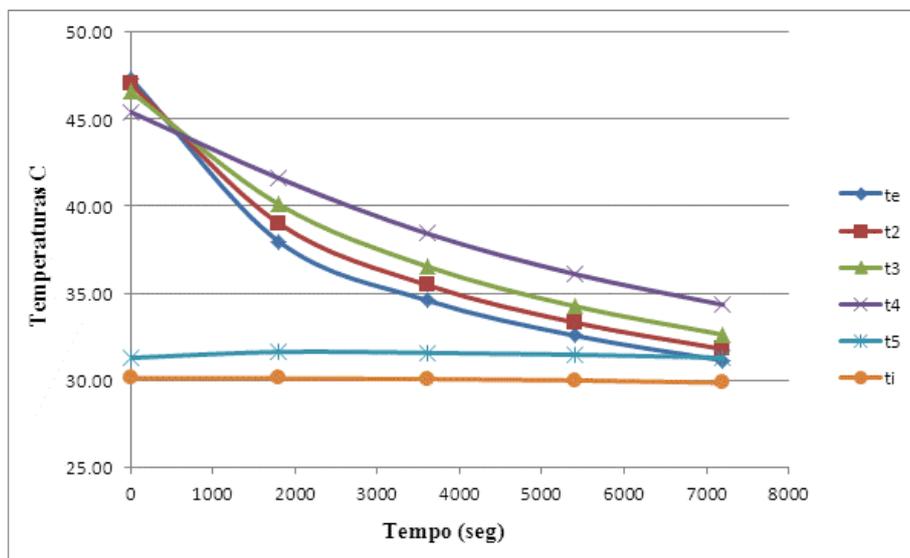


Figura 6.12 Distribuição de Temperatura para as interfaces do sistema de Revestimento para Cerâmica Clara.

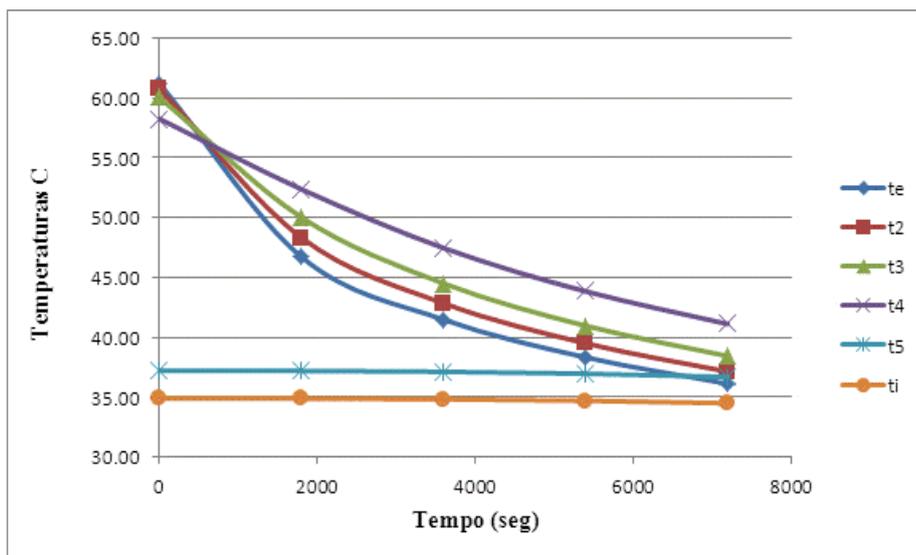


Figura 6.13 Distribuição de Temperatura para as interfaces do sistema de Revestimento para Cerâmica Escura.

Depois de obter as temperaturas no programa ANSYS para os diferentes tempos, 0,001seg, 1800seg, 3600seg, 5400seg, 7200seg, e de fazer as curvas de temperaturas versus o tempo, podem-se determinar os pontos onde a temperatura apresentou uma maior variação nas camadas do sistema de revestimento, e além disso, fazer uma comparação entre dos dois tipos de cerâmica usadas no sistema de revestimento, um com cerâmica clara e o outro com cerâmica escura.

De acordo com a Tabela 6.5 e a Figura 6.12 (Sistema de Revestimento com Cerâmica Clara), expostas anteriormente, pode se observar que o componente do sistema de revestimento que mais sofre mudança de temperatura durante as duas horas do choque térmico e o ponto t_e localizado na parte externa do sistema, ou seja, na cerâmica, começa com uma temperatura de $47,35^{\circ}\text{C}$, e no término das duas horas ela fica com $31,13^{\circ}\text{C}$, fazendo com que a diferença de temperatura nesse ponto seja de $16,22^{\circ}\text{C}$, e no ponto onde se observou menor variação de temperatura foi em t_5 situado na interface da alvenaria e o emboço, onde começou-se com uma temperatura de $31,28^{\circ}\text{C}$, e terminou-se com $31,49^{\circ}\text{C}$, ficando com uma diferença de temperatura de $0,21^{\circ}\text{C}$, neste caso foi ao contrário que no ponto t_e , posto que em t_e observou-se uma diminuição da temperatura, e em t_5 um aumento da mesma.

Também se pode notar que a máxima temperatura que fica no sistema de revestimento ao caso de duas horas é de $34,33^{\circ}\text{C}$, localizada no ponto t_4 , dentre a camada de emboço e a camada de alvenaria, e sendo a mínima de $29,85^{\circ}\text{C}$ situada no ponto t_i , ou seja, na parte interior do sistema de revestimento.

No trecho de tempo onde se apresentou a maior modificação de temperatura foi entre os 0,001seg os 1800seg, onde a diferença de temperatura foi de $9,37^{\circ}\text{C}$, apresentando-se no ponto t_e , e no tempo onde se apresentou a menor mudança de temperatura foi dos 5400seg aos 7200seg, onde a diferença de temperatura tem uma média de $1,11^{\circ}\text{C}$ para todos os pontos das camadas do sistema de revestimento.

Já para o Sistema de Revestimento com Cerâmica Escura, Tabela 6.6 e Figura 6.13, pode-se observar que se tem um comportamento similar ao encontrado no sistema de revestimento com Cerâmica Clara, sendo também que no ponto t_e , apresenta-se a maior mudança de temperatura, começando com $61,20^{\circ}\text{C}$, e ao término das duas horas com uma temperatura de $36,13^{\circ}\text{C}$, com uma diferença igual a $25,07^{\circ}\text{C}$. No ponto onde se encontra a menor mudança de temperatura foi no ponto t_i , localizado na parte interna do sistema de revestimento, onde a variação de temperatura apresentada foi de $0,40^{\circ}\text{C}$, posto que começou-se com uma temperatura de $34,90^{\circ}\text{C}$, terminando-se as duas horas com $34,50^{\circ}\text{C}$, sendo esta parte da camada de emboço.

No intervalo de tempo onde se apresentou a maior mudança de temperatura foi entre os 0,001seg aos 1800seg, ou seja, na primeira meia hora, tendo uma variação de temperatura média de $7,13^{\circ}\text{C}$ em todas as camadas do sistema de revestimento, e no intervalo onde se apresentou a menor mudança de temperatura foi do tempo de 5400 seg aos 7200 seg, onde se apresentou uma média de alteração na temperatura de $1,72^{\circ}\text{C}$, e sendo no ponto t_i onde se apresentou o menor alteração da temperatura, com $2,21^{\circ}\text{C}$ de diferença de temperaturas de um tempo para o outro.

Fazendo-se uma comparação entre o sistema de revestimento com Cerâmica Clara e o sistema de revestimento com Cerâmica Escura, pode-se observar que no segundo sistema se apresentam algumas mudanças maiores de temperaturas nas camadas, sendo na própria cerâmica onde a temperatura é mais afetada com o choque térmico nas duas situações.

6.2 ANÁLISE TERMO-MECÂNICA

Para fazer a análise termomecânica usaram-se as temperaturas das interfaces do sistema de revestimento calculadas na análise do choque térmico, expostas anteriormente. Nesta análise foram estudadas as camadas, Emboço, Argamassa Colante, Cerâmica e o Rejunte, ou seja, as primeiras camadas do sistema de revestimento. Escolheram-se dois pontos no sistema de revestimento usado nesta pesquisa, na metade da longitude em “x” da cerâmica, corte A-A’ e no ponto onde fica o rejunte, corte B-B’, onde se faz uma avaliação das tensões principais geradas pela fadiga devido ao choque térmico no sistema com Cerâmica Clara e com Cerâmica Escura, como se pode observar na Figura 6.14.

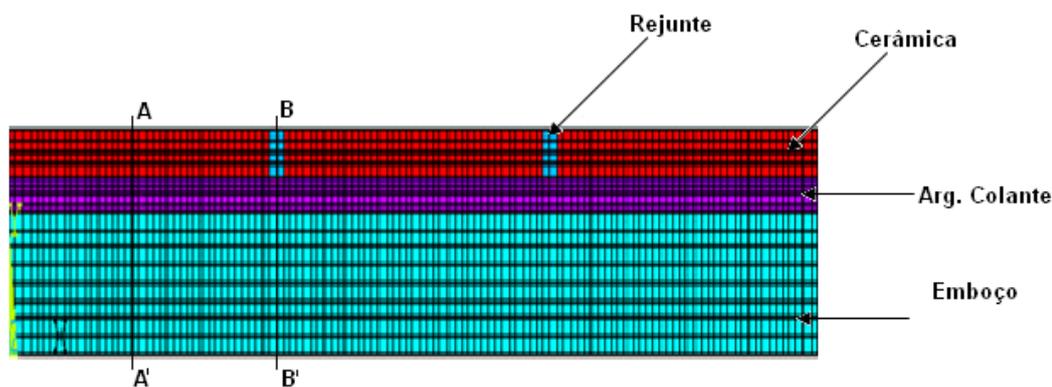


Figura 6.14 Corte A-A' e Corte B-B' a serem estudados.

Depois de se ingressar no programa ANSYS as temperaturas obtidas na análise térmica obtém-se as tensões na direção “x”, “y” e “xy” geradas pelo choque térmico. Na Figura 6.15 mostram-se os nós a serem examinados neste trabalho para o corte A-A’ e B-B’

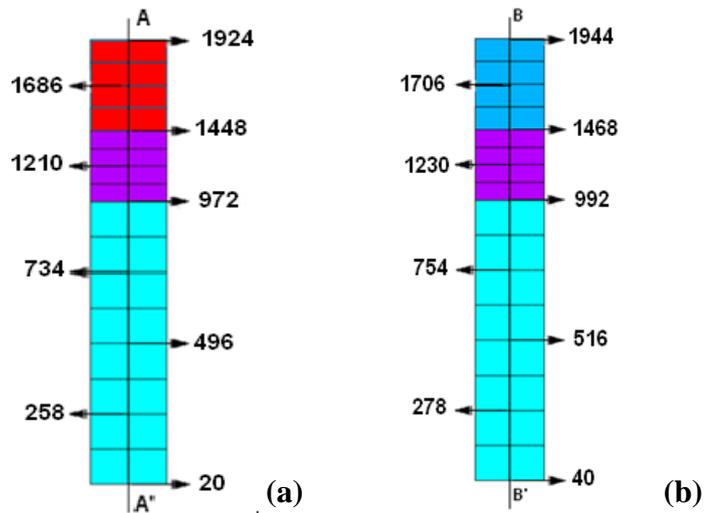


Figura 6.15 (a) Nós do Corte A-A', (b) Corte B-B' com a numeração dos nós a serem estudados.

6.2.1 - Tensões Principais pela Fadiga no Sistema de Revestimento devido ao Choque Térmico

Fez-se uma análise nos nós apresentados anteriormente para o sistema de revestimento com os dois tipos de cerâmica, a Cerâmica Clara e a Cerâmica Escura.

6.2.2.1 - Sistema de Revestimento com Cerâmica Clara:

Nos seguintes gráficos pode-se observar as tensões principais nas direções “x”, “y” e “xy”, nos diferentes tempos escolhidos para se fazer a análise, 0,001seg, 1800seg, 5400seg, 7200seg e nos dos pontos de corte, Corte A-A' e Corte B-B'.

6.2.2.1.1 - Tensões Principais na direção “x”:

Para o Corte A-A' avaliado no sistema de revestimento com cerâmica clara, têm-se as tensões na direção “x” que se mostram na Figura 6.16, as quais são apresentadas durante o tempo de duas horas, se tomaram os nós localizados entre as interfaces das camadas e no meio delas para a análise. De acordo com a Figura 6.16 são os nós 1210 e 972 localizados na camada da argamassa colante os quais têm as magnitudes das tensões na direção

“x”menores no começo do choque térmico, ou seja, aos 0,001seg, apresentando -0,644 MPa para o nó 1210 e -0,645 MPa para o nó 972, estando elas em compressão, e terminando as duas horas com magnitudes das tensões de -0,122 MPa e -0,139 MPa respectivamente e também a compressão.

- Corte A-A'

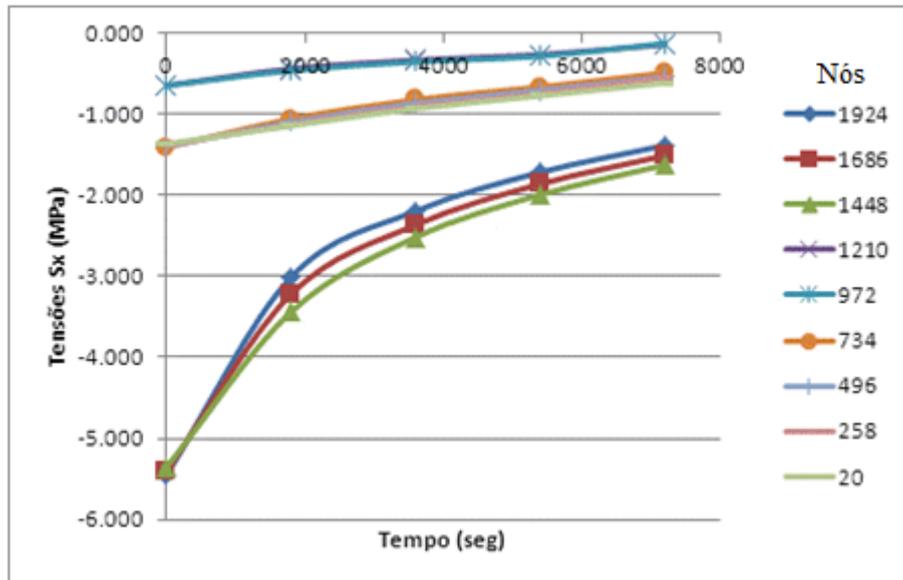


Figura 6.16 Tensões Sx (MPa) - Corte A-A'- Cerâmica Clara.

Pode-se observar também que todos os nós no sistema de revestimento presentes na Figura 6.16 estão solicitados à compressão, a maior tensão mostrada neste corte A-A' tem um valor de -5,452 MPa, apresentada aos 0,001seg, isto é no início do choque térmico, e faz parte do nó 1924 correspondente à camada da cerâmica.

Os nós 972, 1210, presentes na argamassa colante e os nós 734, 258, 496 e 20 presentes no emboço, são os nós que além de ter as tensões menores dentro do sistema mostrado na Figura 6.16, são os mesmos que sofrem as menores mudanças nos valores das tensões, sendo com isso que a solicitações feitas por eles as duas horas vão ser iguais aos menores dentro do sistema de revestimento. No entanto os nós 1924, 1686 e 1448 presentes na camada da cerâmica são os nós que atingem as solicitações maiores, tem uma mudança brusca nas tensões dentro do sistema de revestimento, sendo estes também os mais

expostos aos efeitos do choque térmico, posto que estejam localizados na camada superficial do sistema de revestimento.

Nó 1448 o qual esta localizado na interface da camada da argamassa colante com a camada de emboço e o nó que está atingindo as maiores tensões dentro do sistema de revestimento, no começo do choque térmico aos 0,001seg, com uma tensão de -5,358 MPa a compressão, e as duas horas diminuiu para 3,735 MPa e para assim ficar com uma tensão de -1,623 MPa a compressão, sem ultrapassar o limite da resistência da argamassa colante a fadiga à compressão encontrado anteriormente de 5,06 Mpa.

Na Figura 6.17 onde se amostram as tensões na direção x , para o corte B-B, pode-se observar que as curvas obtidas nestas tensões para este corte, são similares às obtidas para o corte A-A', se diferenciando que as tensões no corte B-B' têm uma magnitude menor. Também se pode observar que o nó presente na camada da argamassa colante e o rejunte, nó 1468, apresenta uma menor magnitude de tensão, do que no corte A-A', e que é o nó pertencente à camada do rejunte o qual vai atingir maiores solicitações à compressão segundo as tensões apresentadas acima, as quais começam nesse nó com um valor igual -3,775 MPa aos 0,001seg e as duas horas tem um valor de -1,087 MPa, devido que neste ponto se faz o corte B-B', está na primeira camada o rejunte, o qual tem um módulo de elasticidade maior que a argamassa colante.

Segundo o exposto por FIORITO (1994), apenas quando as peças cerâmicas são solicitadas à compressão é que existe o risco de colapso e, conseqüentemente, o deslocamento, e observando as Figuras 6.16 e a Figura 6.17 pode se observar que as peças cerâmicas estão sendo solicitadas só a compressão na direção " x ", portanto tem um alto índice de ocasionar o colapso na estrutura de revestimento.

- Corte B-B'

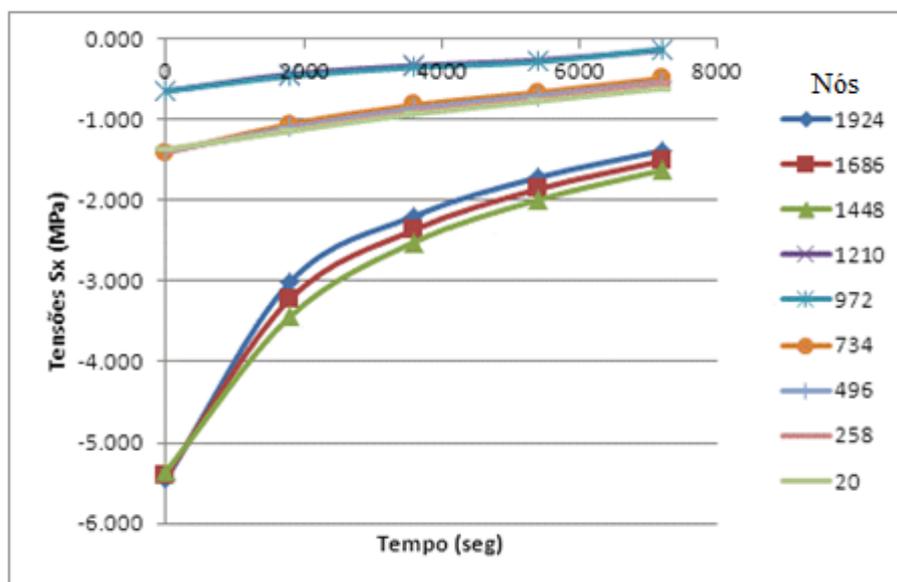


Figura 6.17 Tensões Sx (MPa) - Corte B-B'- Cerâmica Clara.

6.2.2.1.2 - Tensões Principais na direção “y”:

Na Figura 6.18 quais se apresentam as tensões no Corte A-A' na direção “y”, onde pode se observar que as tensões têm valores pequenos, com seleção aos valores obtidos no mesmo ponto de corte na direção “x” e, além disso, tensões a tração. No trecho de tempo de 0,001seg aos 1800seg, em todos os nós pode-se notar a mudança brusca nas tensões, as curvas decrescem de maneira mais acelerada da que nos trechos seguintes. O valor maior de tensão se apresenta no nó 20, com um valor de 0,034 MPa no tempo dos 0,001seg, terminando aos 7200seg com uma tensão de 0,006 MPa, sendo localizado o nó 20 na camada do emboço, também se tem que a cerâmica é o material do sistema de revestimento que carrega os menores valores de tensões durante as duas horas do choque térmico, tendo valores de tensão que variam de 0,005 MPa à 0,001 MPa no nó 1924.

- Corte A-A'

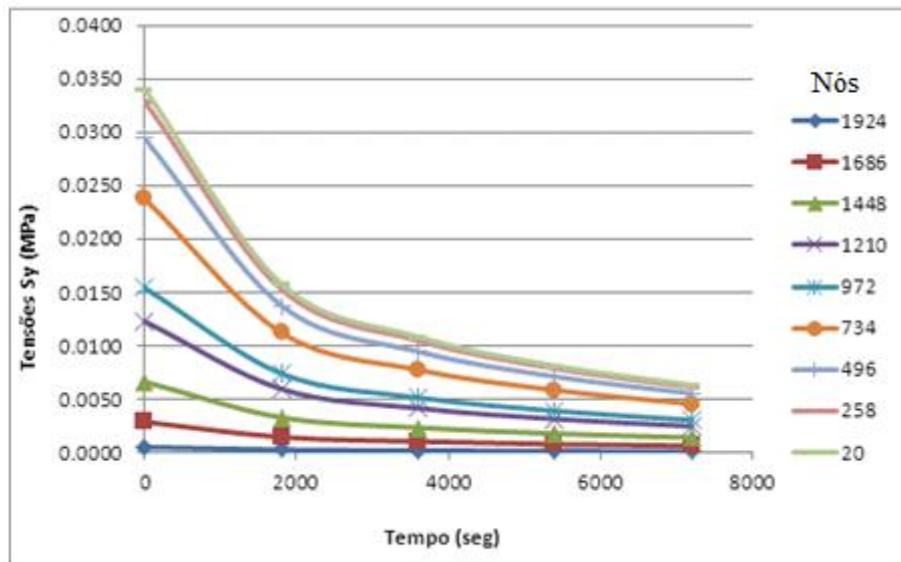


Figura 6.18 Tensões Sy (MPa) - Corte A-A'- Cerâmica Clara.

Na Figura 6.19 acima, pode-se observar que o sistema de revestimento neste Corte B-B', apresentam tensões à compressão tanto como a tração, e correspondem para os nós presentes na superfície ou camada de rejunte as tensões à tração, 1944, 1706 e o nó presente na interface dentre o rejunte e a argamassa colante, 1468, já para os nós presentes nas camadas de argamassa colante e do emboço as tensões são a compressão.

- Corte B-B'

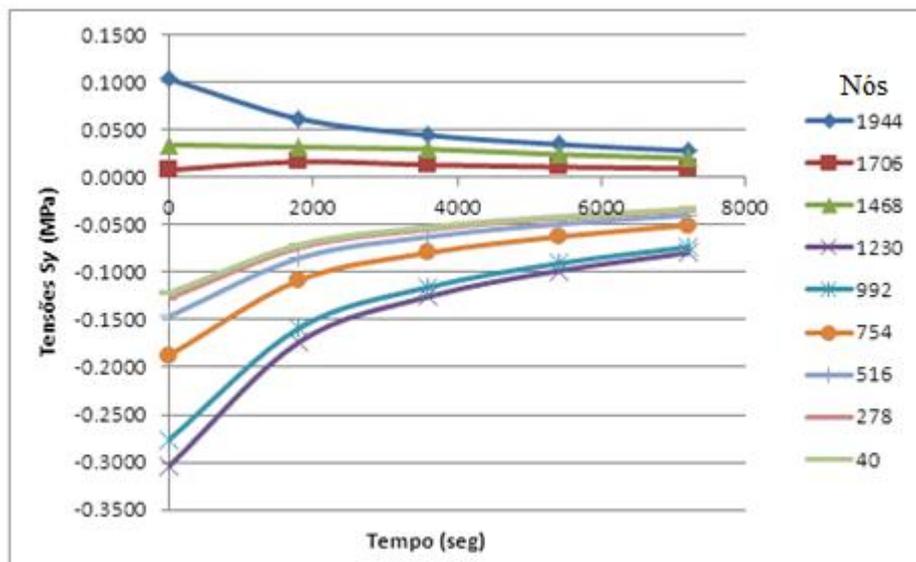


Figura 6.19 Tensões Sy (MPa) - Corte B-B'- Cerâmica Clara.

As tensões a tração variam de 0,104 MPa a 0,010MPa e as tensões a compressão dentre -0,304 MPa a -0,033 MPa, sendo que o nó presente na argamassa colante, 1230, é o que suporta a tensão maior à compressão a qual dá-se no início do choque térmico, ou seja aos 0,001seg, e terminando aos 7200seg com uma tensão a compressão de -0,073 MPa, já para as tensões à tração tem-se que o maior valor é suportado pelo o nó 1944, com 0,104 MPa e terminado aos 7200seg com um valor de tensão de 0,020 MPa, nó presente no sistema de rejunte.

Neste corte B-B' apresenta-se esses dois tipos de tensão, à compressão e à tração, devido a que neste ponto o rejunte está sofrendo uma variação na direção “y” à tração, variação causada pelas peças cerâmicas às quais ele está separando, ocasionando uma pressão nele e gerando uma movimentação para cima e para baixo na direção “y”, e causando com isso que o rejunte faça uma pressão nas camadas da argamassa colante e o emboço, fazerem que elas fiquem sujeitas às tensões de compressão, é por isso que o nó presente na argamassa colante é o que está atingindo um maior valor de tensão a compressão.

6.2.2.1.3 - Tensões Principais na direção “xy”:

A maior de tensão de cisalhamento S_{xy} no sistema para este caso, ocorreu nos nós 972 e 1210 correspondentes à argamassa colante, sendo de 0,0174 MPa aos 0,001seg e 0,0077 MPa aos 7200seg. Enquanto que, na camada do emboço, no nó 20, a tensão de cisalhamento é, praticamente, nula, tendo um valor de 0,0015 MPa aos 0,001seg e terminando aos 7200seg com 0,0007 MPa. Ver Figura 6.20.

Também se pode observar na Figura 6.20, que as mudanças ao longe das duas horas não foram precipitadas, as tensões foram decrescendo nesse tempo, quase que linearmente e pode-se dizer que todos os nós tiveram uma diminuição similar.

- Corte A-A'

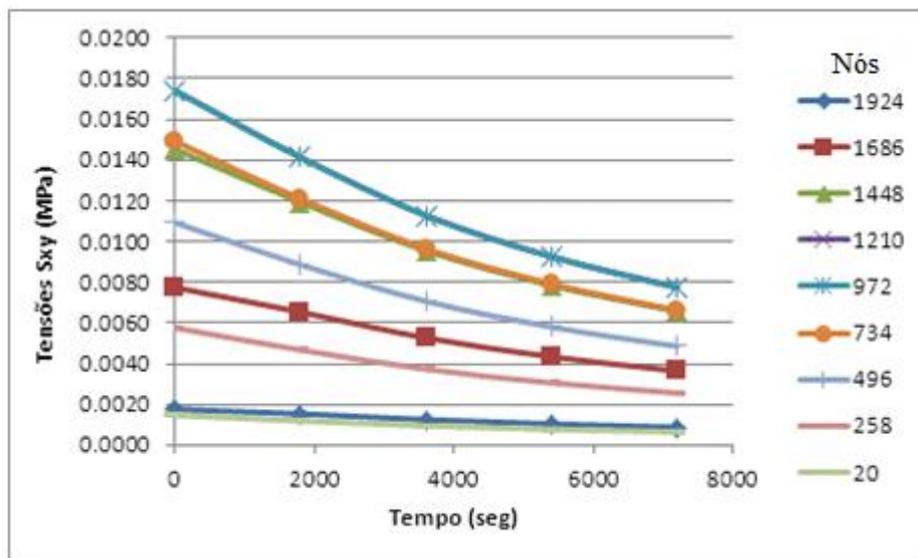


Figura 6.20 Tensões Sxy (MPa) - Corte A-A' - Cerâmica Clara.

- Corte B-B'

Na Figura 6.21 se mostram as tensões de cisalhamento para o corte B-B', onde se observa a similaridade enquanto ao comportamento dos nós do corte A-A' na Figura 6.20. As tensões neste corte também decrescem no término das duas horas do choque térmico, sendo também que os nós presentes na interface da argamassa colante, são as que suportam as tensões maiores no sistema de revestimento, ou seja, o nó 1230, e o nó 992, tendo um valor as tensões de 0,007 MPa e ficando as duas horas com 0,0004 MPa, mas também sendo valores muito baixos ou quase nulos, devido ao fato de as deformações dentro da estrutura ao ser de natureza térmica, não produzem normalmente tensões de cisalhamento.

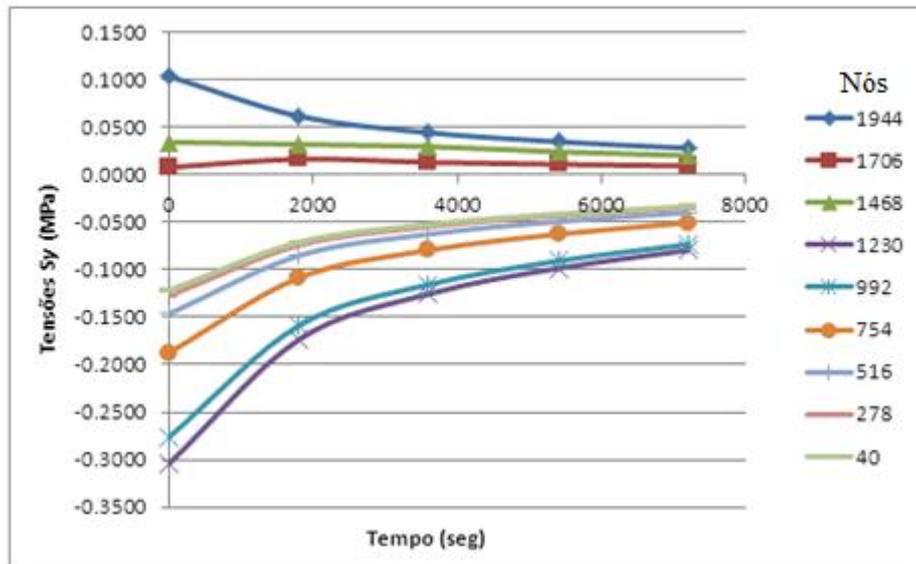


Figura 6.21 Tensões S_{xy} (MPa) - Corte B-B' - Cerâmica Clara.

6.2.2.2 - Sistema de Revestimento com Cerâmica Escura:

Nos seguintes gráficos podem-se observar as tensões principais nas direções “x”, “y” e “xy”, nos diferentes tempos escolhidos para fazer a análise, 0,001seg, 1800seg, 5400seg, 7200seg e nos dos pontos de corte, Corte A-A’ e Corte B-B’.

6.2.2.2.2 - Tensões Principais na direção “x”:

- Corte A-A’

Na Figura 6.22 mostram-se as tensões na direção “x”, presentes no Corte A-A’ para o sistema de revestimento com cerâmica escura, pode se observar que os valores das tensões neste caso têm um comportamento muito similar ao obtido no corte A-A’ para o revestimento com cerâmica clara, sendo também todas as tensões à compressão, com a diferença que as tensões aqui mostradas têm valores maiores, isso devido ao tipo da cor da cerâmica usada neste sistema de revestimento, pelo qual vai absorver maior quantidade de calor, já que seu coeficiente de absorção térmica é maior do que para a cerâmica clara, gerando com isto tensões à compressão maior dentro do sistema de revestimento.

Observa-se que são os nós que ficam próximos à camada de superfície e os que estão presentes na cerâmica que atingem tensões maiores dentro do sistema de revestimento. Os nós 1686, 1924 e 1448 são os nós que suportam o valor de tensão a compressão maior, a qual se dá aos 0,001seg do início do choque térmico, com um valor de -8,684 MPa, é o nó 1448 presente na interface entre a cerâmica e a argamassa colante que aos 7200seg atinge um valor de tensão a compressão de -2,909 MPa, sendo estes os maiores valores de tensão à compressão entre todos os nós. Estes nós também são os que variam durante o tempo das duas horas de maneira mais acelerada, decréscimo os valores das tensões mais bruscamente, estando aos 1800seg com um comportamento linear, depois desse tempo começa ter um comportamento côncavo até os 7200seg.

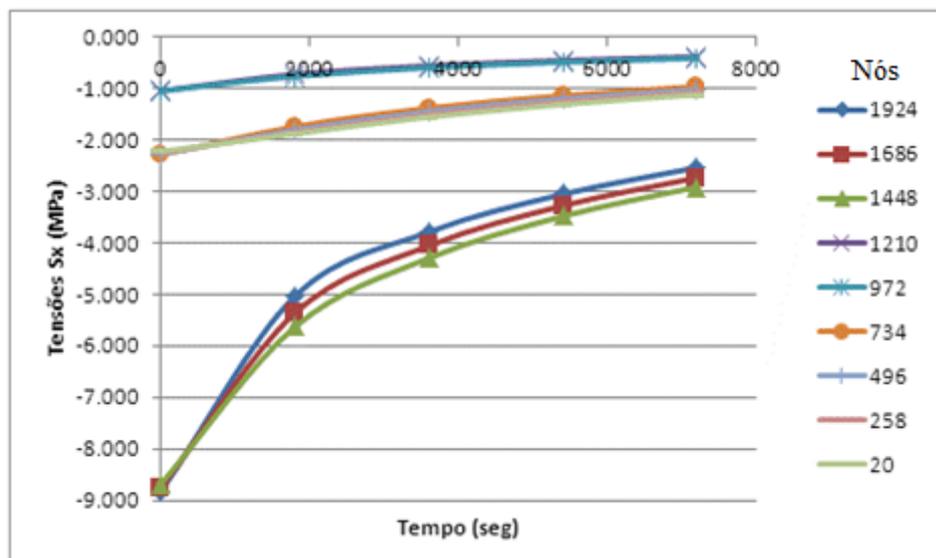


Figura 6.22 Tensões Sx(MPa) - Corte A-A'- Cerâmica Escura.

Os nós presentes na argamassa colante 1210, 972 são os nós que apresentam os valores de tensão à compressão menor dentro do sistema de revestimento cerâmico, e são os que têm uma variação menor no decréscimo das tensões no tempo das duas horas.

- Corte B-B'

Observam-se na Figura 6.23 as tensões na direção “x” para o corte B-B’ no sistema de revestimento com cerâmica escura, onde todas as tensões estão sujeitas à compressão, também se pode ver que o comportamento dos nós é muito similar ao que se obteve no

corte B-B' no sistema de revestimento com cerâmica clara, amostrado na Figura 6.17, sendo também que os valores das tensões à compressão obtidas para o sistema com cerâmica escura são maiores do que as obtidas para o sistema com cerâmica clara.

Os nós da argamassa colante são os que atingem as tensões à compressão com menor valor no sistema, os nós 1230 e 992, sendo que o nó 1230 aos 0,001seg começa com um valor na tensão a compressão de -1,799 MPa e o nó 992 com um valor de -1,453 MPa para o mesmo tempo, e decrescendo esses valores ao término das duas horas, obtém-se com um valor de -0,537 MPa para os dois nós, nota-se que o decréscimo foi maior no trecho dos 0,001seg ao 1800seg.

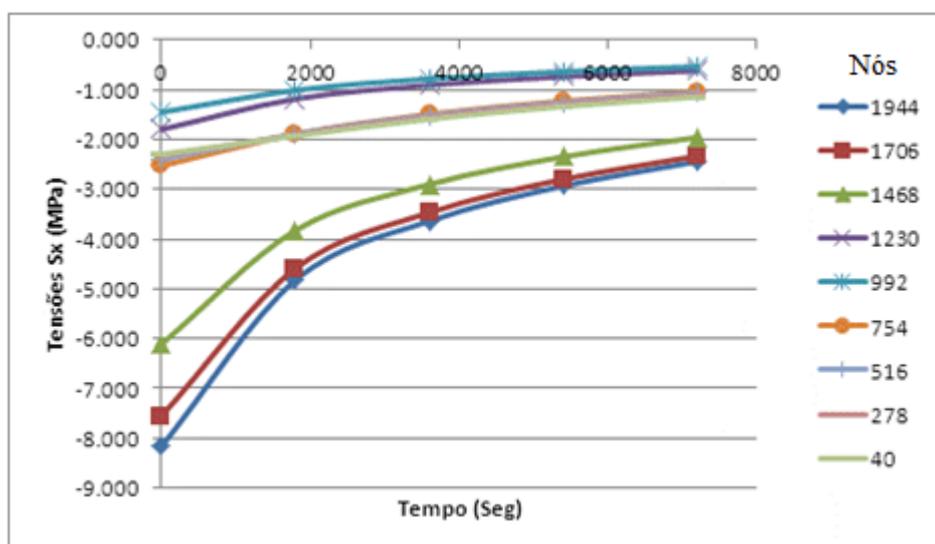


Figura 6.23 Tensões Sx (MPa) - Corte B-B' - Cerâmica Escura.

Ao se comparar as tensões na direção “x” para o sistema de revestimento com cerâmica escura, do corte A-A’, Figura 6.22 e o corte B-B’, Figura 6.23, pode se observar que no corte A-A é o nó que fica na interface da argamassa colante e a cerâmica que atinge a maior tensão à compressão, e que neste caso do corte B-B’ é o nó localizado na camada do rejunte quem atinge essa tensão à compressão maior, a qual tem um valor de -8,170 MPa, decrescendo ao término dos 7200seg com um valor de -2,335 MPa, também sendo valores menores do que os obtidos no corte A-A’ para cerâmica escura, mas ficando maiores que os obtidos no corte B-B’ para o sistema de revestimento com cerâmica clara na direção “x”, da Figura 6.17.

6.2.2.2.3 - Tensões Principais na direção “y”:

Na Figura 6.24, se observa as tensões na direção “y”, no corte A-A para a cerâmica escura, as quais estão sujeitas a tração, sendo esses valores mínimos ou quase nulos para todos os nós, os valores oscilam dentre 0,0549 Mpa e 0,0012 MPa.

A maioria dos nós tem a mudança das tensões à tração mais acelerada no trecho dos 0,001seg aos 1800seg, como se pode ver na Figura 6.24 acima, sendo os nós pertencentes à camada do emboço os que atingem as tensões com um valor maior.

- Corte A-A'

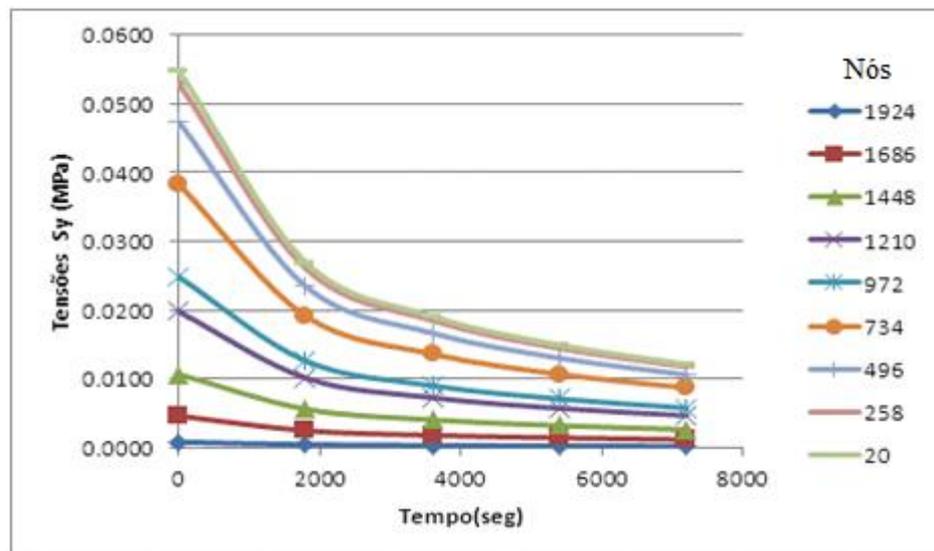


Figura 6.24 Tensões Sy (MPa) - Corte A-A'- Cerâmica Escura.

- Corte B-B'

A Figura 6.25 acima mostra as tensões na direção y para o corte B-B' no sistema de revestimento com cerâmica escura, no qual se podem observar tensões à tração e a compressão. Nesta Figura 6.25 acontece o mesmo fenômeno que já foi explicado para as tensões na direção “y” no corte B-B' para um sistema de revestimento com cerâmica clara, Figura 6.19, só que as tensões que aparecem no sistema com cerâmica escura têm valores maiores do que no sistema com cerâmica clara devido ao coeficiente de absorção térmica

da cerâmica escura também seu maior, gerando com isso maiores tensões dentro do sistema de revestimento. É importante ressaltar que os valores obtidos para as tensões na direção “y” são baixos ou quase nulos para todo o sistema de revestimento, ou seja, o sistema não tem se visto muito afetado pelas solicitações das tensões na direção “y”.

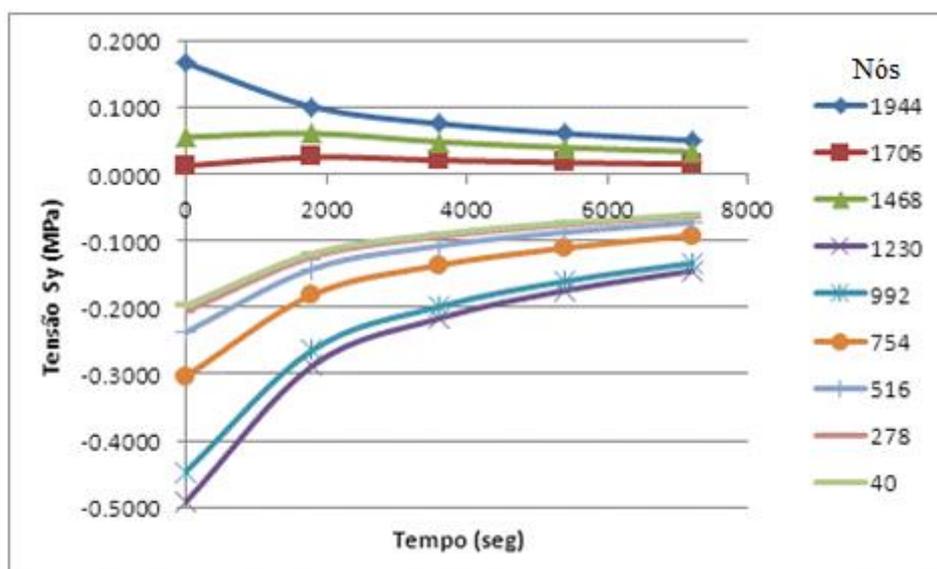


Figura 6.25 Tensões Sy (MPa) - Corte B-B'- Cerâmica Escura.

6.2.2.2.3 - Tensões Principais na direção “xy”:

- Corte A-A'

Podem-se observar na Figura 6.26 as tensões de cisalhamento na direção “xy” no corte A-A', para o sistema de revestimento com cerâmica escura, onde se nota um comportamento decrescente nas tensões atuantes nos nós, onde a maior tensão atuante tem um valor de 0,028 MPa aos 0,001seg, apresentada no nó 972 e 1210 presentes na argamassa colante, ficando aos 7200seg com um valor de 0,013 MPa, e os menores valores de tensão ao cisalhamento dão-se no nó 20, localizado na camada do emboço, com valores de 0,002 Mpa aos 0,001seg e terminando com 0,001 MPa aos 7200seg, tendo uma variação mínimo dentro do tempo das duas horas. O desempenho dos nós neste caso é similar aos nós do corte A-A' do sistema de revestimento com cerâmica clara, expostos na Figura 6.20,

diferenciando-se nos valores obtidos nas tensões que são maiores, mais também sendo tensões ao cisalhamento baixas.

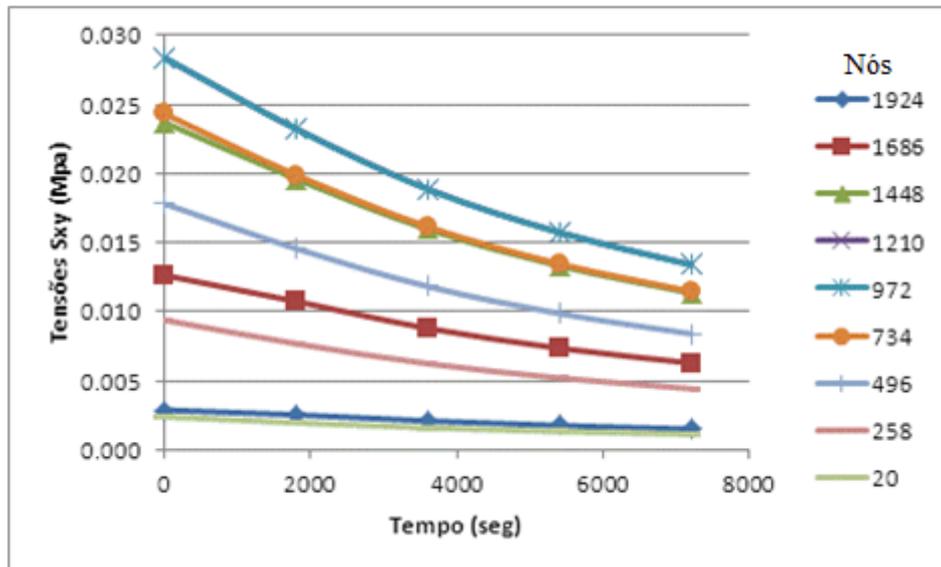


Figura 6.26 Tensões Sxy(MPa) - Corte A-A' - Cerâmica Escura.

- Corte B-B'

Na Figura 6.27, se pode observar o decréscimo das tensões de cisalhamento nos nós presentes no corte B-B' para o sistema de revestimento com cerâmica escura, sendo valores menores do que para os nós presentes no corte A-A' para o mesmo tipo de sistema de revestimento, expostos na Figura 6.26, mais também tendo valores maiores nas tensões de cisalhamento obtidas para os nós presentes no sistema de revestimento com cerâmica clara, ver Figura 6.21.

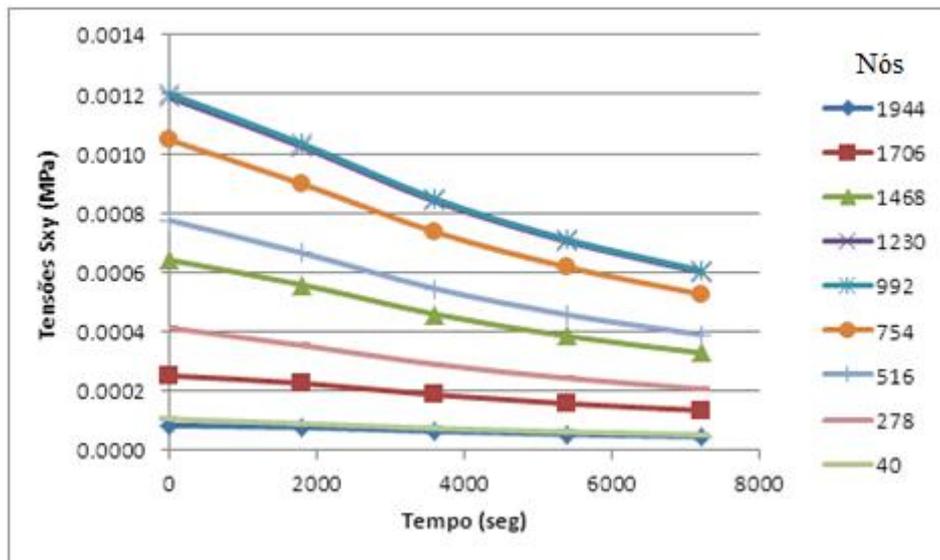


Figura 6.27 Tensões Sxy (MPa) - Corte B-B'- Cerâmica Escura.

Na Figura 6.28 observa-se um exemplo do diagrama das tensões na direção “x” no sistema de revestimento cerâmico, na primeira meia hora, onde anteriormente determinou-se que é onde acontecem as tensões com maior valor geradas pelo efeito do choque térmico, onde a cor amarela, laranja e vermelha, são os valores de tensões máximas, localizadas nas primeiras camadas do sistema, ou seja, na cerâmica, no rejunte e na argamassa colante, já as cores azuis, são os valores de tensões com mínimas, presente na camada do emboço.

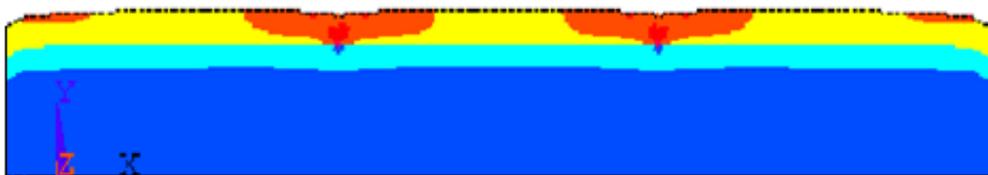


Figura 6.28 Tensões atuantes no Sistema de Revestimento na direção “x” na primeira meia hora.

Pode se observar na Figura 6.29, também a modo de exemplo para os dois tipos de revestimento estudados nesta pesquisa, a atuação das tensões no modelo, onde a cor amarela, laranja e vermelha, representam às tensões à tração, as quais estão presentes na parte onde está localizado o rejunte entre as peças cerâmicas, produzindo pressão nas camadas abaixo dele, gerando as tensões à compressão no sistema, representados pelas cores verdes.



Figura 6.29 Tensões atuantes no Sistema de Revestimento na direção “y” na primeira meia hora.

6.3 ANÁLISE DE FADIGA

6.3.1 - Análise de Fadiga do corpo de prova à compressão-Argamassa Colante

Para a análise de fadiga do corpo de prova modelado no ANSYS à compressão, Figura 5.5, trabalhou-se com as tensões à compressão máxima e mínima mostradas na Tabela 5.6, para os três tipos de carregamento, apresentadas nos nós 290 e 469 respectivamente.

Tabela 6.7 Análise à Fadiga a compressão para a carga 1

Carga 1 (N/m ²)	Smáx (MPa)	Smín (MPa)	ΔS= Smáx-Smín (MPa)
86068,03	14,65	10,41	4,24

Tabela 6.8 Análise à Fadiga a compressão para a carga 2

Carga2 (N/m ²)	Smáx (MPa)	Smín (MPa)	ΔS= Smáx-Smín (MPa)
66038.96	11,24	7,92	3,33

Tabela 6.9 Análise à Fadiga a compressão para a carga 3

Carga3 (N/m ²)	Smáx (MPa)	Smín (MPa)	ΔS= Smáx-Smín (MPa)
38991.24	6,63	4,67	1,96

Tendo o limite de fadiga a compressão $\sigma_{Rcf} = 5,06$ MPa encontrado no Capítulo 4 através dos ensaios feitos no laboratório, e fazendo uma comparação com a análise feita na Tabela 6.7, Tabela 6.8 e Tabela 6.9, pode-se observar que para as três cargas usadas no modelo trabalhado no ANSYS, não há risco de ruptura à compressão, já que o valor encontrado na análise a fadiga de 4,24 MPa, 3,33 MPa e 1,96 MPa para a carga 1 de 86068,03 N/m²,

carga 2 de 66038,96 N/m² e carga 3 de 38991,24N/m² respectivamente são menores que o limite de fadiga à compressão.

6.3.2 - Análise de Fadiga na Argamassa Colante do Sistema de Revestimento

Para fazer a análise à fadiga da argamassa colante, o material no qual se foca esta pesquisa, escolheu-se tomaram as maiores tensões principais atuando na direção “x” e “y”, as quais se apresentaram na primeira meia hora do choque térmico, nos dois tipos de revestimento, no composto por cerâmica clara e o outro com cerâmica escura, faz se a análise nos nós presentes na argamassa colante, para o corte A-A’ e corte B-B’, também foi usada a curva experimental representada na Figura 4.18 para saber se existe o risco ou não de ruptura por fadiga.

6.3.2.1 - Análise de Fadiga na Cerâmica Clara

- **Direção x**

Corte A-A’

Nós: 1448 e 972 da Argamassa Colante

$$S_{\text{máx}} = 0,643 \text{ MPa}$$

$$S_{\text{min}} = 0,645 \text{ MPa}$$

$$\Delta S = S_{\text{máx}} - S_{\text{min}} \quad (5.24)$$

$$\Delta S = 0,645 - (0,642) = 0,003 \text{ MPa. À compressão.}$$

Limite de Ruptura por Fadiga é: $\sigma_{Rcf} = 5,06 \text{ MPa}$.

Com $\Delta S = 0,003 \text{ Mpa} < \sigma_{Rcf} = 5,06 \text{ Mpa} \longrightarrow$ Não há risco de ruptura por fadiga.

Corte B-B’

Nós: 1468 e 992 da Argamassa Colante

$$S_{\text{máx}} = 2,178 \text{ MPa}$$

$$S_{\text{min}} = 0,895 \text{ MPa}$$

$\Delta S = 2,178 - (0,895) = 1,28$ MPa. À compressão.

Limite de Ruptura por Fadiga é: $\sigma_{Rcf} = 5,06$ MPa.

Com $\Delta S = 1,28$ Mpa $< \sigma_{Rcf} = 5,06$ Mpa \longrightarrow Não há risco de ruptura por fadiga.

Nos cálculos feitos acima, observa-se as tensões máximas e mínimas na direção x para o cálculo da fadiga na argamassa colante, onde se determinou que não existe risco de ruptura por fadiga, nos nós presentes nesta camada do revestimento, a qual está sendo solicitada à compressão.

- **Direção y**

Corte A-A'

Nós: 1448 e 972

$S_{\text{máx}} = 0,015$ MPa

$S_{\text{min}} = 0,0012$ MPa

$\Delta S = 0,015 - 0,0012 = 0,014$ MPa. À Tração.

Limite de Ruptura por Fadiga é: $\sigma_{Rtf} = 1,69$ MPa.

Com $\Delta S = 0,014$ Mpa $< \sigma_{Rtf} = 1,69$ Mpa \longrightarrow Não há risco de ruptura por fadiga.

Corte B-B'

Nós: 1230 e 992

$S_{\text{máx}} = 0,276$ MPa

$S_{\text{min}} = 0,1128$ MPa

$\Delta S = 0,276 - (0,1128) = 0,163$ MPa. À compressão.

Limite de Ruptura por Fadiga é: $\sigma_{Rcf} = 5,06$ MPa.

Com $\Delta S = 0,163$ Mpa $< \sigma_{Rf} = 5,06$ Mpa \longrightarrow Não há risco de ruptura por fadiga.

Com as tensões na direção “ y ”, se obteve na análise à fadiga nestes cortes, que a argamassa colante sendo solicitada em tração como em compressão, não tem risco de ruptura.

6.3.2.2 - Análise de Fadiga na Cerâmica Escura

- **Direção x**

Corte A-A'

Nós: 1448 e 972

$$S_{\text{máx}} = 1,047 \text{ MPa}$$

$$S_{\text{min}} = 1,042 \text{ MPa}$$

$$\Delta S = 1,047 - (1,042) = 0,005 \text{ MPa. À compressão.}$$

Limite de Ruptura por Fadiga é: $\sigma_{RCf} = 5,06 \text{ MPa}$.

Com $\Delta S = 0,005 \text{ MPa} > \sigma_{RCf} = 5,06 \text{ MPa} \longrightarrow$ Não há risco de ruptura por fadiga.

Corte B-B'

Nós: 1468 e 992

$$S_{\text{máx}} = 3,529 \text{ MPa}$$

$$S_{\text{min}} = 1,453 \text{ MPa}$$

$$\Delta S = 3,529 - (1,453) = 2,076 \text{ MPa. À compressão.}$$

Limite de Ruptura por Fadiga é: $\sigma_{RCf} = 5,06 \text{ MPa}$.

Com $\Delta S = 2,076 \text{ MPa} < \sigma_{RCf} = 5,06 \text{ MPa} \longrightarrow$ Não há risco de ruptura por fadiga.

Na análise feita na cerâmica escura, observa-se que para o Corte A-A' e o Corte B-B' não existe risco de ruptura por fadiga na argamassa colante à compressão na direção x, que a tensão a Fadiga encontrada no Corte A-A' é menor do que o valor encontrado no Corte B-B', como era de se esperar, posto que as tensões no corte B-B' foram maiores dentro dos dois tipos de sistema de revestimento.

- **Direção y**

Corte A-A'

Nós: 1448 e 972

$$S_{\text{máx}} = 0,014 \text{ MPa}$$

$$S_{\text{min}} = 0,012 \text{ MPa}$$

$\Delta S = 0,014 - 0,012 = 0,002 \text{MPa}$. À Tração.

Nosso Limite de Ruptura por Fadiga é: $\sigma_{Rtf} = 1,69 \text{MPa}$.

Com $\Delta S = 0,002 \text{Mpa} < \sigma_{Rtf} = 0,253 \text{Mpa} \longrightarrow$ Não há risco de ruptura por fadiga.

Corte B-B'

Nós: 1230 e 992

$S_{\text{máx}} = 0.2639 \text{ MPa}$

$S_{\text{min}} = 0.18 \text{MPa}$

$\Delta S = 0.263 - (0.180) = 0.083 \text{ MPa}$. À compressão

Limite de Ruptura por Fadiga é: $\sigma_{Rcf} = 5.06 \text{ MPa}$.

Com $\Delta S = 0.083 \text{Mpa} < \sigma_{Rf} = 5.06 \text{ Mpa} \longrightarrow$ Não há risco de ruptura por fadiga.

As tensões máximas e mínimas na direção y , apresentadas na argamassa colante, e a análise à fadiga feita pode-se observar que nos dois cortes não há risco de ruptura à compressão, devido que as tensões apresentadas nos nós da argamassa colante têm um valor menor do que se encontrou nos ensaios de fadiga amostrados na análise experimental apresentado no capítulo 4.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste Capítulo serão dadas algumas conclusões observadas depois de obter os resultados nos ensaios experimentais feitos na Argamassa Colante sob a fadiga e da análise numérica realizada no modelo simplificado no sistema de revestimento cerâmico sob a ação do choque térmico.

7.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Os corpos de prova usados nos ensaios experimentais de fadiga a compressão, atenderam às expectativas esperadas para obter as curvas S-N ou de Wohler. Foram feitos ensaios dinâmicos com carregamentos e frequência constantes, com isto não foi possível verificar a influência da frequência no comportamento à fadiga da argamassa colante, mesmo assim que os sistemas de revestimento estejam sujeitos à ação de cargas e frequências variáveis.

Durante os ensaios experimentais de fadiga, pode-se notar que os corpos de prova de argamassa colante ensaiados em um mesmo nível de tensão rompiam com um número de ciclos pouco variáveis, isto devido a controle rigoroso no processo de produção das argamassas, moldagem e cura dos corpos de prova, como também no alinhamento perpendicular do corpo de prova na máquina de ensaio. Portanto, deve-se usar um corpo de prova de boa qualidade preparado de acordo com os parâmetros que estão presentes na norma. Os ensaios sob fadiga foram feitos com pelo menos 3 corpos de prova para cada nível de tensão, sendo usados dois níveis de tensão, uma quantidade que se considerou suficiente e razoável para se chegar a um valor médio do valor da resistência à fadiga.

Com uma tensão igual a 5,06 MPa, os corpos de prova não sofreram ruptura até o número de ciclos igual a $10^{6.02}$. Com isso, pode-se definir a resistência à fadiga a compressão da argamassa colante como $\sigma_{Rcf} = 5,06$ MPa, correspondendo a 48,14% do valor da resistência à compressão ($f_{ck}=10,51$ MPa) obtido no ensaio à compressão da argamassa colante.

Neste trabalho optou-se em verificar o comportamento à fadiga da argamassa colante a compressão, para isso foram executados ensaios em corpos de prova de argamassa colante

sob carga cíclica. Trabalhou-se a argamassa colante com um material frágil, e adotou-se a curva de Coulomb-Mohr para trabalhar o comportamento da argamassa colante similar ao comportamento que tem o concreto, para poder se ter uma idéia ou hipótese de qual seria a provável curva de ruptura da argamassa à fadiga a compressão e a tração. Observou-se que as argamassas de revestimento sofreram um processo gradual de dano por fadiga, provocando-se assim uma diminuição da resistência à fadiga na medida em que se aumentava o número de ciclos de carregamento.

Foram traçadas curvas de ruptura à compressão no estado plano para a argamassa colante, posto que neste trabalho não foi possível a realização de ensaios à fadiga sob tração, assim com essas curvas obteve-se também a resistência da argamassa colante à tração.

Durante os ensaios, houve a dificuldade na execução dos mesmos, na disposição do laboratório de mecânica, devido que nem sempre o laboratório se encontrava na disposição para a realização dos mesmos.

7.2 ANÁLISE NUMERICA

Para o estudo numérico foi usado um sistema de revestimento com dois tipos de cerâmicas uma clara e a outra escura, nelas trabalhou-se com diferentes temperaturas respectivamente, e obtiveram-se as tensões atuantes para os dois tipos de revestimento cerâmico, chegando à conclusão, de que quando se utiliza a cerâmica escura se corre maior risco que o sistema falhe em menor tempo, devido ao coeficiente de absorção térmica na cerâmica escura ser maior do que na cerâmica clara, 0,95 e 0,45 respectivamente, e com isso, o calor que entra na estrutura seja maior e mais concentrado nela.

Foram sempre os valores obtidos na cerâmica clara menores dos obtidos na cerâmica escura, devido também pelo exposto acima. As tensões na direção “x” estiveram sempre sujeitas a tensão de compressão na estrutura ao longo do tempo das duas horas, tendo uma tendência ao decréscimo com o passar do tempo, sendo os nós presentes na intempérie, os que atingiram as tensões com maior valor dentro dos sistemas de revestimento.

As tensões obtidas na direção “y” foram de um valor mínimo com respeito aos valores obtidos na direção “x”, apresentando-se em tração e em compressão nos dois tipos de revestimento usados nesta pesquisa. No corte A-A’ obtiveram-se tensões a tração e no corte B-B’ tensões à tração e compressão, isto devido que no corte B-B’ nos dois tipos de revestimento cerâmico, estão presentes o rejunte como camada de intempérie, fazendo com isto que exista uma maior tendência de expulsão entre a argamassa colante e a camada de emboço, e uma maior compressão no rejunte, ocasionando um deslocamento do filete de rejunte, devido à pressão que fazem as peças cerâmicas sobre o rejunte.

Na direção “xy” foram encontradas umas tensões de valor baixo e atuando toda a tração, tendo variações pouco aceleradas e em decréscimo, e sendo os nós presentes da argamassa colante, os que se obtiveram os valores da tensão à cisalhamento maior de 0,028MPa no corte B-B’ para a cerâmica escura, mas mesmo assim sendo pequenos, ao se comparar com o valor da resistência à fadiga que se conseguiu nos ensaios experimentais feitos, a qual foi de 5,06 MPa.

7.3 ANÁLISE A FADIGA

Para o corpo de prova à compressão modelada no ANSYS, Figura 5.5, se obtiveram tensões muito próximas às obtidas nos ensaios experimentais à fadiga à compressão feitos no laboratório da mecânica, confirmando-se com isto que o procedimento com o qual se trabalhou na parte experimental foi feito da maneira correta, e o limite da Fadiga à compressão encontrada para a Argamassa Colante – ACII de 5,06 MPa é coerente.

Com os cálculos obtidos na análise à fadiga feito na argamassa colante, pode-se notar que é importante a cor da cerâmica usada no sistema de revestimento cerâmico, já que pelos resultados obtidos, ao ser usada a cerâmica escura no sistema se obtém valores de tensões maiores e com isso umas tensões à fadiga igualmente maiores, isto também devido ao coeficiente de dilatação térmica, o qual tem maior valor na cerâmica escura do que na cerâmica clara.

7.4 TRABALHOS FUTUROS

Fazer ensaios experimentais submetendo corpos de prova de fadiga à tração utilizando a argamassa colante ACII e realizar uma comparação com a resistência encontrada através desta pesquisa com ajuda dos ensaios de fadiga à compressão.

Realizar a modelagem no ANSYS utilizando modelos em 3D, do sistema de revestimento, para assim ter uma maior aproximação dos resultados esperados.

Simular ensaios experimentais, analisando o choque térmico no sistema de revestimento, por exemplo, com painéis onde se tenha os diferentes materiais que compõem o sistema, e colocando ele a um choque térmico, com ajuda de lâmpadas para dar calor e de água para simular a chuva, tendo também medidores de tensões e de deslocamento nas diferentes camadas, para com isso ter resultados mais precisos e podendo-se comparar com o feito nesta pesquisa numericamente.

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

- ABNT NBR 13276. *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Preparo da mistura e determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro. 2002.
- ABNT NBR 13279, *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro. 2005.
- ABNT NBR 13280, *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido*. Rio de Janeiro. 2005.
- ABNTNBR 13281, *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Requisitos*. Rio de Janeiro. 2005.
- ABNT NBR 13529, *Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas — Terminologia*. Rio de Janeiro. 1995.
- ABNT NBR 13816, *Placas Cerâmicas Para Revestimento - Terminologia-*. Rio de Janeiro. 1997.
- ABNTNBR 14081, *Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Requisitos*, Rio de Janeiro. 2005.
- ABNT NBR 5738, *Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Documentos Técnicos*. Rio de Janeiro. 2003.
- ANSYS - *Analysis System* – Houston, PA- USA. 2007.
- BROEK, D - *The Practical Use of Fracture Mechanics* Kluwer Academic Publisher, OH, USA. 1988.
- BSI - *British Standards Institution. BS 1377. Determination by Liquid Limit by Cone Penetrometer Method*. London. 1975.
- CAVALHEIRO, O.P. *Argamassa de assentamento: Receita, dosagem ou adequação de traço*. Brasil. 1990.
- CERVO, T.C. *Estudo da Resistência à Fadiga de Concreto de Cimento Portland para Pavimentação. Tese de Doutorado*. EP-USP, Brasil. 2004.
- CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C. e CARASEK, H. *Argamassas de Revestimento: Características, Propriedades e Métodos de Ensaio*. Boletim 68 – IPT, São Paulo. 1995.

- CHAGAS, S. V. M. *Estudo e proposta de um modelo de resistência à fadiga de argamassa de revestimento em estado plano e tridimensional de tensões. Faculdade de Tecnologia- UnB. Brasília, DF. 2009.*
- CLAUDIO O. SILVA. *Análise crítica dos requisitos e critérios de qualidade da argamassa colante. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2003.*
- COSTA E SILVA, A. J. *Descolamentos dos revestimentos cerâmicos de fachada na cidade do Recife. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2001, 25p. (Boletim Técnico da EPUSP, BT/PCC/241).*
- FIORITO, A. J. S. I. *Manual de Argamassa e Revestimento – Estudo e Procedimento de Execução. Editora Pini. São Paulo, SP. 1994.*
- FREITAS Jr, J. A. *Execução em argamassas e gesso. Ministério da Educação. Universidade Federal do Paraná. Paraná. 2004.*
- FROTA, A. B. e SCHIFFER, S. R. *Manual de Conforto Térmico. Studio Nobel, Sexta Edição. São Paulo, SP. 2003.*
- FUSCO, P. B. *Tecnologia do concreto estrutural. 2008*
- HENY, W. G. E e VERA, S. J. G (2007) *Estudio Del daño acumulado por fatigas em juntas soldadas de Acero AISI/SAE 1045 por soldadura manual al arco com electrodos revestidos “smaw”.* Universidad Central de Venezuela.
- INMENT- *Institucionacional de Meteorologia.2012*
- JASTRZEBSKI, Z. D. *The Nature and Properties of Engeneering Materials. Editora John Willey & Sons, New York, USA. 1977.*
- JOSE M. A. JÚNIOR. *Contribuição ao estudo das propriedades físico-mecânicas das argamassas de revestimento. Faculdade de Tecnologia- UnB. Brasília, DF. 2004.*
- JUNGINGER, MAX. *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. 2003.*
- LOBATO PAES, I. N. e CARASEK, H. *Desempenho das Argamassas de Rejuntamento no Sistema de Revestimento Cerâmico. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construtivo, Porto Alegre, Rs. 2001.*
- MAURICIO M. RESENDE, MÉRCIA M.S.B. BARROS e JONAS S. MEDEIROS. *A influência da manutenção na durabilidade dos revestimentos de fachada de edifícios. Escola politécnica da USP. São Paulo, 1998.*

- MOSCOSO, Y. F. M. *et al* (a). *13h International Conference on Frature (ICF13)*.Beijin, China. 2013.
- MOSCOSO, Y. F. M. *et al* (b). *Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto, CBC2013. IBRACON*. Gramado, Rio Grande do Sul. 2013.
- MECÂNICA DA FRATURA. *Fundamentos da mecânica da fratura e da propagação de trincas por fadiga. Certificação digital N^o9816415/CA*. PUC-Rio.
- PALMGREN - MINER. *Regla de Miner o Dano Linear*. 1945
- RELEJS TEPFERS and THOMAS KUTTI.*Fatigue strength of plain, ordinary and lightweight concrete*.ACI- Journal- Technicalpaper. 1979.
- RIVERO, R. *Acondicionamento Térmico Natural - Arquitetura e Clima, Universidade Rio Grande do Sul*, Rio Grande do Sul. 1985.
- ROSA M. MENDES. *Concentração de tensões. Superior de Tecnologia- IPS*. 2003.
- ROSCOE, M. T. *Patologias em revestimento cerâmico de fachada. Universidade Federal de Minas Gerais*. Minas Gerais. 2008.
- SABATINI. FERNANDO H.*Tecnologia de execução de revestimentos de argamassas, Escola politécnica da U.S.P (EPUSP)*. São Paulo. 2001.
- SARAIVA, A. G.*Contribuição ao estudo de tensões de natureza térmica em sistemas de revestimento cerâmico de fachada. Faculdade de Tecnologia- Universidade de Brasília*, Brasília, DF. UnB. 1998.
- SILVA, M. N. B.*Avaliação Numérica com o Método dos Elementos Finitos das Tensões Termo-Mecânica em Sistema de Revestimento de Fachadas. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília*, Brasília, DF. 2000.
- SILVA, J. S. G e FORTES, A. S.*Fissuração nas argamassas de revestimento em fachadas. Universidade Católica do Salvador*. Salvador. 2010.
- THOMAZ E. *Trincas em Edifícios- Causas, Prevenção e Recuperação. Co-edição IPT/EPUSP/PINI*. São Paulo, SP. 1989.
- UCHÔA, J. C. B. *Procedimento numérico e experimental para a avaliação da resistência à fadiga de sistemas de revestimento. Faculdade de Tecnologia- UnB*. Brasília, DF. 2007.
- ZHANG, J *et al*. *Size effect on fatigue in bending of concrete*.*Journal of materials in civil engineering*.2001.

Fotografia de Fachadas, <<https://www.google.com.br/fachadas+de+casa>>. Acesso em:
Junho de 2012.

Fotografiade deslocamento em Fachadas,
<<https://www.google.com.br/revestimento+ceramico>>. Acesso em : Dezembro de
2012.

APENDICE A

Na tabela A.1 são apresentados os valores das cargas calculadas para usar no ensaio de fadiga a compressão na argamassa colante.

Tabela A.1 Cálculo das cargas para o ensaio de Fadiga.

FORÇA DE RUPTURA DE FÁDIGA À COMPRESSÃO DA ARGAMASSA COLANTE II		
BASE = $\pi \times r^2$		[cm]
r=raio da circunferência	10,00	[cm]
$\pi=3,1415$	3,14	[cm]
A = $\pi \times r^2$	78,54	[cm ²]
TENSÃO		
Compressão-Máx-Arg. Colante.	10,51	[MPa]
Força	86,04	[kN]
Faixa de trabalho da Máquina		
Mín	1,00	[kN]
Máx	100,00	[kN]
Níveis do TESTE		
3 exp.		
1,0*(0,8)*Ft	67,34	[KN]
0,6*(0,8)*Ft	39,76	[KN]
0,3*(0,8)*Ft	19,81	[KN]

APÊNDICE B

RESULTADOS DAS TENSÕES CERÂMICA CLARA-CORTE A-A'

Nas Tabelas B.1 à B.3 são apresentados os valores das tensões nas direções (S_x , S_y , S_{xy}) nas camadas do sistema de revestimento, nos cortes especificados Corte A-A' , Figura 6.16, no método de elementos finitos.

Tabela B.1 Tensões S_x

Direção S_x	Tempo (seg)				
	0,001	1800	3600	5400	7200
1924	-5,452	-3,009	-2,191	-1,714	-1,382
1686	-5,404	-3,218	-2,362	-1,859	-1,507
1448	-5,358	-3,438	-2,516	-1,991	-1,623
1210	-0,644	-0,434	-0,327	-0,261	-0,139
972	-0,645	-0,460	-0,351	-0,282	-0,122
734	-1,407	-1,054	-0,817	-0,661	-0,486
496	-1,397	-1,094	-0,863	-0,703	-0,535
258	-1,382	-1,123	-0,900	-0,740	-0,549
20	-1,362	-1,141	-0,929	-0,771	-0,611

Tabela B.2 Tensões Sy

Direção Sy	Tempo (seg)				
	0,001	1800	3600	5400	7200
Nós	0,001	1800	3600	5400	7200
1924	0,0005	0,0003	0,0002	0,0001	0,0001
1686	0,0029	0,0015	0,0010	0,0008	0,0006
1448	0,0066	0,0033	0,0023	0,0018	0,0014
1210	0,0123	0,0059	0,0042	0,0031	0,0025
972	0,0154	0,0074	0,0051	0,0039	0,0030
734	0,0238	0,0112	0,0077	0,0058	0,0046
496	0,0294	0,0137	0,0095	0,0071	0,0055
258	0,0329	0,0153	0,0105	0,0079	0,0061
20	0,0340	0,0158	0,0108	0,0081	0,0063

Tabela B.3 Tensões Sxy

Direção Sxy	Tempo (seg)				
	0,001	1800	3600	5400	7200
Nós	0,001	1800	3600	5400	7200
1924	0,0018	0,0015	0,0013	0,0010	0,0009
1686	0,0078	0,0065	0,0053	0,0043	0,0036
1448	0,0145	0,0119	0,0096	0,0078	0,0066
1210	0,0174	0,0141	0,0113	0,0093	0,0078
972	0,0174	0,0141	0,0113	0,0093	0,0077
734	0,0149	0,0121	0,0097	0,0079	0,0066
496	0,0109	0,0089	0,0071	0,0058	0,0049
258	0,0058	0,0047	0,0037	0,0031	0,0026
20	0,0015	0,0012	0,0010	0,0008	0,0007

APENDICE C

RESULTADOS DAS TENSÕES CERÂMICA CLARA-CORTE B-B'

Nas Tabelas C.1 à C.3 são apresentados os valores das tensões nas direções (S_x , S_y , S_{xy}) nas camadas do sistema de revestimento, nos cortes especificados e Corte B-B', Figura 6.16, no método de elementos finitos.

Tabela C.1 Tensões S_x

Direção S_x	Tempo (seg)				
	0,001	1800	3600	5400	7200
Nós					
1944	-5,046	-2,886	-2,115	-1,660	-1,342
1706	-4,666	-2,733	-2,021	-1,590	-1,288
1468	-3,775	-2,200	-1,697	-1,338	-1,087
1230	-1,109	-0,709	-0,534	-0,424	-0,360
992	-0,895	-0,608	-0,462	-0,369	-0,232
754	-1,557	-1,145	-0,886	-0,715	-0,618
516	-1,479	-1,146	-0,903	-0,735	-0,618
278	-1,436	-1,158	-0,928	-0,762	-0,697
40	-1,407	-1,172	-0,954	-0,790	-0,707

Tabela C.2 Tensões Sy

Direção Sy	Tempo (seg)				
	0,001	1800	3600	5400	7200
Nós	0,001	1800	3600	5400	7200
1944	0,1038	0,0620	0,0446	0,0350	0,0283
1706	0,0081	0,0167	0,0134	0,0111	0,0095
1468	0,0346	0,0322	0,0299	0,0244	0,0204
1230	-0,3041	-0,1736	-0,1255	-0,0983	-0,0794
992	-0,2761	-0,1588	-0,1155	-0,0906	-0,0732
754	-0,1872	-0,1084	-0,0793	-0,0623	-0,0504
516	-0,1462	-0,0850	-0,0624	-0,0490	-0,0397
278	-0,1272	-0,0741	-0,0545	-0,0428	-0,0347
40	-0,1215	-0,0708	-0,0521	-0,0410	-0,0332

Tabela C.3 Tensões Sxy

Direção Sxy	Tempo (seg)				
	0,001	1800	3600	5400	7200
Nós	0,001	1800	3600	5400	7200
1944	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1706	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
1468	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002
1230	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003
992	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004	0,0004
754	0,0006	0,0005	0,0004	0,0004	0,0003
516	0,0005	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002
278	0,0003	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
40	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000

APÊNDICE D

RESULTADOS DAS TENSÕES CERÂMICA ESCURA-CORTE A-A'

Nas Tabelas D.1 à D.3 são apresentados os valores das tensões nas direções (S_x , S_y , S_{xy}) nas camadas do sistema de revestimento, nos cortes especificados Corte A-A', Figura 6.16, no método de elementos finitos.

Tabela D.1 Tensões S_x

Direção S_x	Tempo (seg)				
	0,001	1800	3600	5400	7200
1924	-8,826	-5,034	-3,785	-3,050	-2,533
1686	-8,752	-5,359	-4,052	-3,274	-2,730
1448	-8,684	-5,629	-4,290	-3,478	-2,909
1210	-1,045	-0,719	-0,555	-0,452	-0,380
972	-1,047	-0,759	-0,593	-0,486	-0,409
734	-2,286	-1,738	-1,375	-1,133	-0,957
496	-2,272	-1,802	-1,446	-1,199	-1,017
258	-2,251	-1,848	-1,505	-1,257	-1,072
20	-2,220	-1,877	-1,551	-1,306	-1,119

Tabela D.2 Tensões Sy

Direção Sy	Tempo(seg)				
Nós	0,001	1800	3600	5400	7200
1924	0,0008	0,0004	0,0003	0,0003	0,0002
1686	0,0046	0,0025	0,0018	0,0014	0,0012
1448	0,0107	0,0056	0,0040	0,0032	0,0026
1210	0,0198	0,0102	0,0073	0,0057	0,0047
972	0,0249	0,0126	0,0090	0,0071	0,0058
734	0,0384	0,0192	0,0136	0,0107	0,0087
496	0,0475	0,0235	0,0167	0,0130	0,0106
258	0,0531	0,0261	0,0185	0,0144	0,0117
20	0,0549	0,0270	0,0191	0,0149	0,0121

Tabela D.3 Tensões Sxy

Direção Sxy	Tempo (seg)				
Nós	0,001	1800	3600	5400	7200
1924	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001
1686	0,013	0,011	0,009	0,007	0,006
1448	0,024	0,020	0,016	0,013	0,011
1210	0,028	0,023	0,019	0,016	0,013
972	0,028	0,023	0,019	0,016	0,013
734	0,024	0,020	0,016	0,013	0,011
496	0,018	0,015	0,012	0,010	0,008
258	0,009	0,008	0,006	0,005	0,004
20	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001

APENDICE E

RESULTADOS DAS TENSÕES CERÂMICA CLARA-CORTE B-B'

Nas Tabelas E.1 à E.3 são apresentados os valores das tensões nas direções (S_x , S_y , S_{xy}) nas camadas do sistema de revestimento, nos cortes especificados e Corte B-B', Figura 6.16, no método de elementos finitos.

Tabela E.1 Tensões S_x

Direção S_x	Tempo(seg)				
	0,001	1800	3600	5400	7200
Nós					
1924	-8,826	-5,034	-3,785	-3,050	-2,533
1686	-8,752	-5,359	-4,052	-3,274	-2,730
1448	-8,684	-5,629	-4,290	-3,478	-2,909
1210	-1,045	-0,719	-0,555	-0,452	-0,380
972	-1,047	-0,759	-0,593	-0,486	-0,409
734	-2,286	-1,738	-1,375	-1,133	-0,957
496	-2,272	-1,802	-1,446	-1,199	-1,017
258	-2,251	-1,848	-1,505	-1,257	-1,072
20	-2,220	-1,877	-1,551	-1,306	-1,119

Tabela E.2 Tensões Sy

Direção Sy	Tempo(seg)				
	0,001	1800	3600	5400	7200
Nós					
1944	0,1680	0,1020	0,0766	0,0617	0,0514
1706	0,0133	0,0263	0,0216	0,0181	0,0157
1468	0,0565	0,0620	0,0492	0,0406	0,0346
1230	-0,4922	-0,2875	-0,2163	-0,1743	-0,1449
992	-0,4470	-0,2639	-0,1988	-0,1604	-0,1334
754	-0,3031	-0,1807	-0,1364	-0,1101	-0,0916
516	-0,2368	-0,1419	-0,1072	-0,0866	-0,0721
278	-0,2059	-0,1238	-0,0936	-0,0756	-0,0630
40	-0,1967	-0,1184	-0,0895	-0,0723	-0,0602

Tabela E.3 Tensões Sxy

Direção Sxy	Tempo(seg)				
	0,001	1800	3600	5400	7200
Nós					
1944	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,00005
1706	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001
1468	0,0006	0,0006	0,0005	0,0004	0,0003
1230	0,0012	0,0010	0,0008	0,0007	0,0006
992	0,0012	0,0010	0,0008	0,0007	0,0006
754	0,0010	0,0009	0,0007	0,0006	0,0005
516	0,0008	0,0007	0,0005	0,0005	0,0004
278	0,0004	0,0004	0,0003	0,0002	0,0002
40	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001