



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

ANÁLISE DE TENSÕES INTERNAS EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS DE FACHADAS NO DISTRITO FEDERAL DEVIDO A CARREGAMENTOS TÉRMICOS UTILIZANDO MODELAGEM MEF 3D

João Carlos Barleta Uchôa

Luciano Mendes Bezerra

Marcus Alexandre Noronha de Brito

Antonio Carlos Montandon Júnior

Willian Taylor Matias Silva

uchoa@unb.br

lmbz@unb.br

marcusanb@yahoo.com.br

junior@pmon.com.br

taylor@unb.br

Affiliation

Universidade de Brasília, 70910-900, Distrito Federal, Brasil.

Abstract. *Some regions of Brazil are subjected to thermal variations of such level where tensions generated by these loads lead to a low efficiency of ceramic tile systems on the facades. The Federal District is one of those regions where temperatures in some seasons outweigh the treated and established a rule. Because of that this work develops a model of a complete system 3D of a ceramic coating on the facade, with the adoption of physical characteristics and actual thermal conditions measured with support from the National Institute of Meteorologia- INMET, thus evaluating the spread of these tensions to long layers of this type of system the same way that its resistance to adhesion.*

Keywords: *Finite Elements, Ceramic Coatings Thermal Loads, Stress Analysis*

1 INTRODUÇÃO

É importante analisar e compreender o funcionamento dos sistemas de revestimento cerâmicos empregados nas fachadas. Apesar de todas essas características negativas, o sistema de revestimento cerâmico de fachadas pode apresentar ainda sérios problemas de deslocamento causado, principalmente, por variações de tensões as quais as fachadas estão submetidas. Essas tais variações de tensão advém, principalmente, de variação de temperatura, tais como a variação de temperatura em função do aquecimento da fachada durante o dia e o resfriamento da mesma durante a noite, além das ocasionadas por chuvas e rajadas de vento, entre outras.

Este trabalho, portanto, analisa o comportamento de sistemas de revestimentos cerâmico de fachadas por meio de um estudo com simulação numérica do sistema com todos os seus materiais componentes quando o mesmo está submetido às variações de temperatura, oriundas do meio ambiente.

Assim tem-se como objetivo analisar numericamente um modelo, utilizando pacote computacional de elementos finitos, FEA (Finite Element Analysis), as tensões cíclicas provenientes do carregamento térmico.

2 O SISTEMA DE REVESTIMENTO CERÂMICO

Carasek (2007) apresenta três funcionalidades principais de um revestimento. Inicialmente, destaca que os revestimentos externos tem a função de proteger a alvenaria e a estrutura contra a ação do intemperismo. Além disso, os revestimentos tem a função de integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com diversas funções, tais como, isolamento térmico (~30%), isolamento acústico (~50%), estanqueidade à água (~70 a 100%), segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais. Por fim, o revestimento permite regularizar a superfície dos elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo para a estética da edificação.

O sistema de revestimento cerâmico em fachadas, embora muito e tradicionalmente empregado no Brasil, apresenta patologias cujos mecanismos, ainda, são pouco entendidos. Tais patologias podem ter suas origens tanto na falta de planejamento de execução, bem como, na falta de procedimentos de racionalização e controle de execução (CAMPANTE e BAÍA, 2003), na elevada rigidez das argamassas colantes, na umidade, no efeito expansivo da temperatura, associado à variação dos coeficientes de dilatação térmica entre os materiais constituintes do sistema de revestimento e as deficiências (falta de flexibilidade adequada) das juntas (rejuntas) entre as cerâmicas. Todos estes fatores podem contribuir

para o aparecimento de patologias no sistema de revestimento cerâmico. Em contrapartida, o sistema de revestimento cerâmico é menos susceptível ao aparecimento de trincas fora dos rejuntas, bolores, empolamento, frequentemente observados nos revestimentos à base de argamassa e pintura ou em acabamentos em pedras naturais, entre outros (SARAIVA, 1998).

Os revestimentos cerâmicos são constituídos de diversas camadas de materiais diferentes e ligados entre si. Essas camadas são distribuídas em base ou substrato, chapisco, argamassa de assentamento, argamassa colante e revestimento cerâmico, como mostrado na Figura 1 de Junginger (2003). Como as camadas estão diretamente ligadas entre si, qualquer deformação em uma dessas camadas resultará no aparecimento de tensões em todo o conjunto do sistema de revestimento cerâmico. Tais tensões dependem de todas as características físicas e mecânicas de cada camada, como, por exemplo, da espessura e do módulo de elasticidade (FIORITO, 1994).

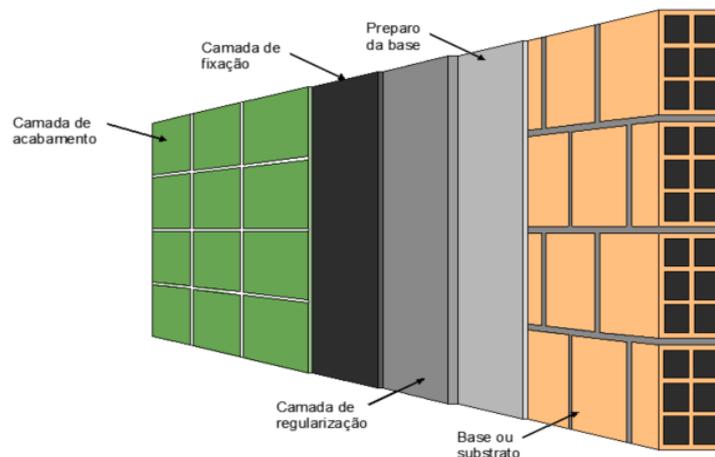


Figura 1 - Estrutura de sistema de revestimento cerâmico. Adaptado: (JUNGINGER, 2003).

Um dos principais fatores que influenciam na degradação de um sistema de revestimento cerâmico de fachadas é o aspecto climático, uma vez que as variações de temperatura e a umidade provocam deformações ocasionando tensões no revestimento que podem levar à sua ruptura.

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

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

O *Centre Scientifique et Technique du Batiment* (CSTB) 1999, apresenta que existe um fator agravante das tensões já existentes na interface da argamassa colante e a placa cerâmica que é a variação de temperatura entre a instalação do revestimento e as condições habituais de uso. Além disso, o CSTB descreve que o aumento de tensões em pisos cerâmicos depende de três fatores, que são: cor da placa cerâmica, coeficiente de dilatação térmica da placa cerâmica, e natureza da obra. A influência desses fatores em revestimentos cerâmicos em fachadas foi estudada em uma pesquisa aliada a um modelo matemático e um estudo experimental. Esses estudos mostraram que há um incremento de cerca de 24 °C das temperaturas superficiais das placas cerâmicas de cor escura e não esmaltadas. Entretanto, o incremento das temperaturas superficiais nas placas cerâmicas de cor clara e não esmaltadas foi de 5 °C. Além disso, o estudo destaca que, quanto mais alto for a edificação, haverá um incremento no nível de tensões de cisalhamento de origem térmica.

3 AS TENSÕES TÉRMICAS

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

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

Para analisar o efeito da tensão de tração sobre o sistema de revestimento cerâmico, consideramos o trecho de revestimento da Figura 2, sob uma temperatura ambiente inicial T_0 e recebendo um aumento gradativo da temperatura ($T_1 > T_0$). A despeito disso, conforme apresentado na Figura 3, as placas cerâmicas tendem a se afastar umas das outras de maneira não uniforme, devido ao coeficiente de dilatação térmica e ao módulo de elasticidade das placas não serem iguais, fazendo com que as juntas se abram, dando origem ao processo de cisalhamento simples entre a base das peças (tardoz) e a argamassa colante. Se a resistência de aderência da interface da camada regularizadora emboço/argamassa colante/cerâmica for inferior ao cisalhamento (τ), às placas da base se soltarão da camada regularizadora ocorrendo o deslocamento do revestimento cerâmico, como mostrado na Figura 3. Em seguida ao aumento gradativo da temperatura ($T_1 > T_0$), havendo, por exemplo, uma queda gradual de temperatura ($T_2 < T_0$), ocorre um encurtamento da base fazendo com que as peças soltas tomem a forma de um “V” invertido, como apresentado na Figura 4 (FIORITO, 1994).

A tensão de compressão no sistema de revestimento cerâmico pode ser causada pela retração da camada de emboço quando essa base de argamassa, considerada isoladamente, retrai nas extremidades do sistema causando tensões de cisalhamento atuando na interface camada de emboço/argamassa colante/cerâmica. Conseqüentemente, a distância inicial “d” da placa diminui para “d₁”, como mostrado na Figura 5 (FIORITO, 1994).

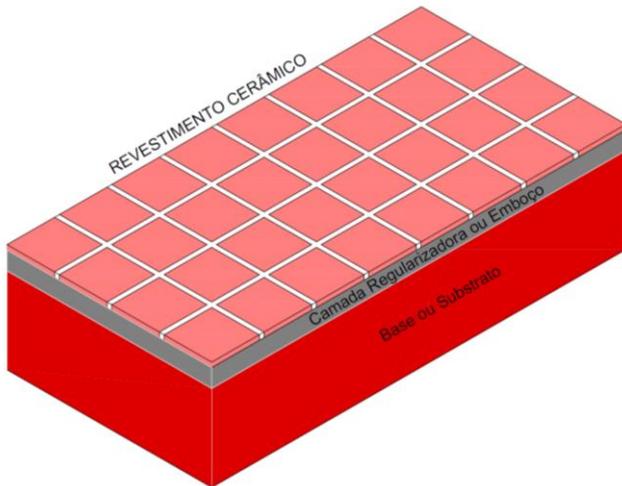


Figura 2 - Sistema de revestimento cerâmico na temperatura inicial T_0 . (UCHÔA, 2007).

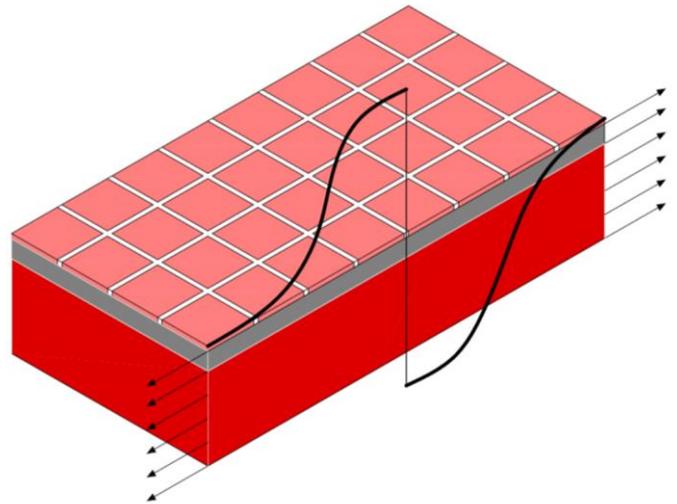


Figura 3 - Processo de cisalhamento no sistema de revestimento cerâmico $T_1 > T_0$. (UCHÔA, 2007).

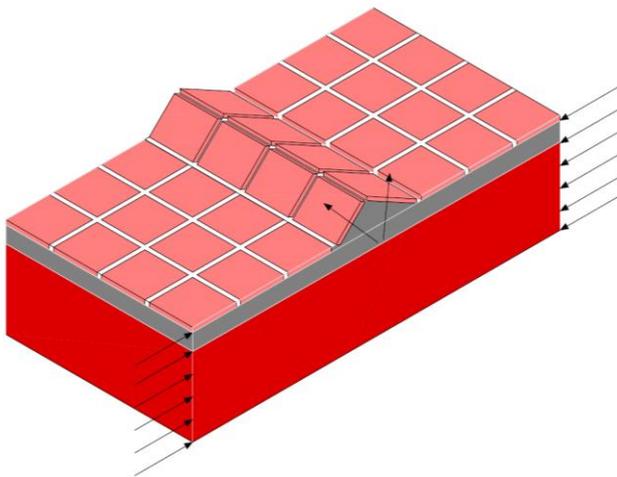


Figura 4 - Sistema de revestimento cerâmico após queda de temperatura $T_2 < T_0$. (UCHÔA, 2007).

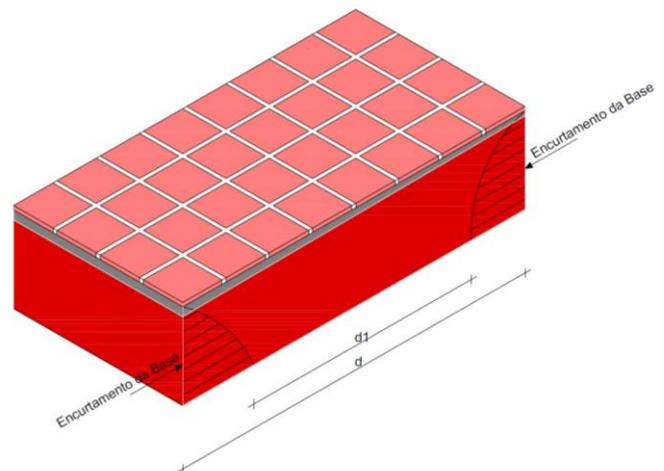


Figura 5 - Tensão de compressão atuando no sistema de revestimento cerâmico. (UCHÔA, 2007).

Já na Figura 6 mostra a ação das forças “p” e “q” geradas em função da tensão de compressão do sistema mostrada na Figura 5. A força “p” é a componente vertical de tração que tende a arrancar o revestimento de sua base. Enquanto, a força “q” representa a resistência de aderência que se opõe à força “p”. Quando a aderência for maior que a componente vertical de tração ($q > p$), haverá tensão de compressão, mas o revestimento permanece estável (FIORITO, 1994).

Na Figura 7 mostra que as peças cerâmicas se soltam da base quando a força “p” é maior ou igual à resistência de aderência “q”, ocorrendo assim o abaulamento das placas cerâmicas e o seu posterior colapso como mostrado na Figura 8 (FIORITO, 1994).

ANÁLISE DE TENSÕES INTERNAS EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS DE FACHADAS NO DISTRITO FEDERAL DEVIDO A CARREGAMENTOS TÉRMICOS UTILIZANDO MODELAGEM MEF 3D

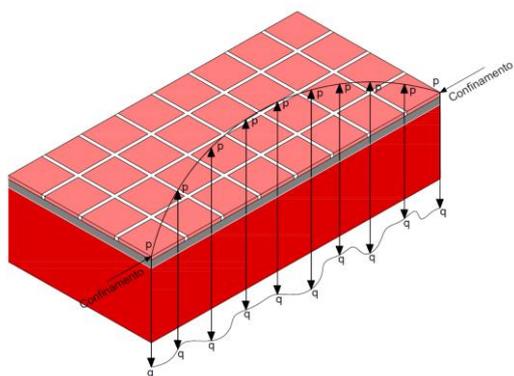


Figura 6 - Representação das forças “p” e “q” atuando no revestimento cerâmico. (UCHÔA, 2007).

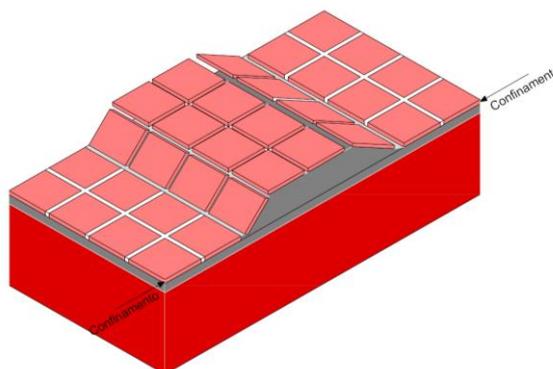


Figura 7 - Sistema de revestimento cerâmico entrando em colapso. (UCHÔA, 2007).

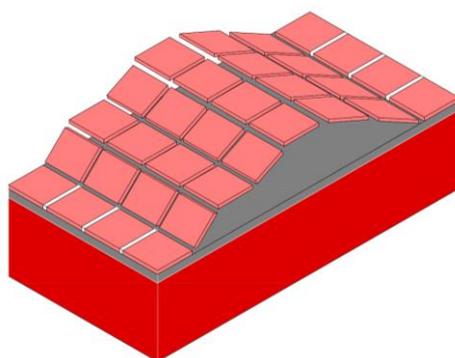


Figura 8 - Colapso do sistema de revestimento cerâmico. (UCHÔA, 2007).

A Figura 9 mostra um carregamento cíclico de tensões regulares (amplitude constante) com a tensão máxima ($S_{m\acute{a}x}$) e a tensão mínima ($S_{m\acute{i}n}$) sendo aplicadas durante um determinado intervalo de tempo (Magnabosco, 2000).

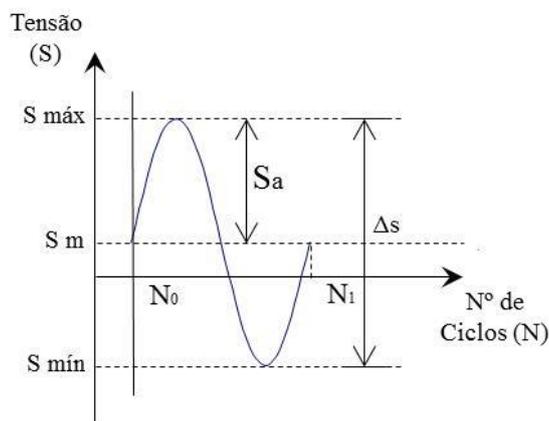


Figura 9 - Dados utilizados para os ensaios de fadiga. (Magnabosco, 2000).

A amplitude da tensão alternada (S_a) é dada pela diferença entre a tensão máxima ($S_{máx}$) e a tensão mínima ($S_{mín}$) dividido por 2, conforme mostrado na Eq. (1).

$$S_a = \left(\frac{S_{máx} - S_{mín}}{2} \right) \quad (1)$$

A relação entre a variação da tensão (ΔS) e a tensão alternada (S_a) é dada pela Eq. (2).

$$\Delta S = 2S_a \quad (2)$$

A tensão média (S_m) das tensões máxima ($S_{máx}$) e mínima ($S_{mín}$) é dada pela Eq. (3).

$$S_m = \left(\frac{S_{máx} + S_{mín}}{2} \right) \quad (3)$$

A relação entre a tensão mínima ($S_{mín}$) e a tensão máxima ($S_{máx}$) representa a razão de tensão em fadiga (R) e é demonstrada na Eq. (4).

$$R = \frac{S_{mín}}{S_{máx}} \quad (4)$$

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

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

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

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

Entretanto, se esses componentes de tensão principal (σ_1 ; σ_2) caírem fora das curvas, então há risco de colapso mostrado na Figura 10.

A curva de resistência para materiais dúcteis como o aço se apresenta com a diminuição gradativa da resistência. Similarmente, pode-se adotar esse mesmo comportamento de curva de resistência para a argamassa colante (materiais frágeis). Nesse caso, a curva de resistência deve ser uma curva apropriada para materiais frágeis, pois cada material dúctil ou frágil segue determinadas curvas características de resistência. Para a fadiga, a diminuição gradativa da resistência, com o passar dos ciclos de carga, pode ser representada pela Figura 11 que ilustra esse comportamento de encolhimento da curva de resistência para materiais frágeis, como o concreto, e adotado nesta pesquisa para a argamassa colante.

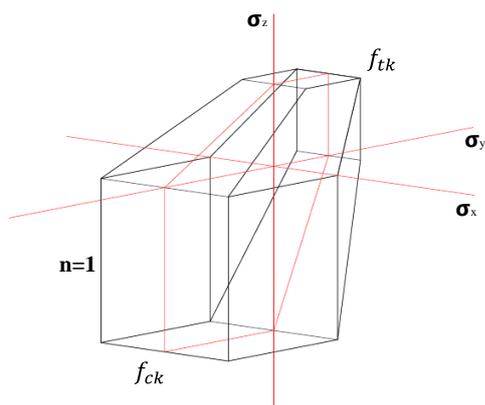


Figura 10 - Curva de Coulomb-Mohr para materiais frágeis. Adaptado: (UCHÔA, 2007)

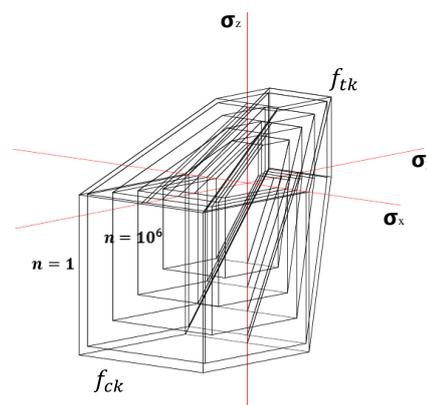


Figura 11 - Curvas de resistência para material frágil durante os ciclos de carga. Adaptado: (UCHÔA, 2007)

Ainda, na Figura 11 considera-se que haverá ruptura ou não de um material frágil, respectivamente, se for observado que o ponto (σ_1 , σ_2) cai dentro ou fora das curvas de resistência para um determinado número de ciclos de carga “ $n=i$ ”. Quando há tensões combinadas, por exemplo, estados de tensão bi ou tridimensional, com componentes normais e de cisalhamento.

Ao ser definido um critério de ruptura para a fadiga e usando as curvas S-N de Wöhler de forma experimental, utilizando-se testes com tensões alternadas à tração e à compressão, pode-se determinar como ocorre a diminuição das resistências à tração (f_{tk}) e à compressão (f_{ck}) com o passar dos ciclos de carga. Entretanto, nos últimos anos, os pesquisadores têm preferido levantar a curva S-N para o concreto sob tração (Lee e Barr, 2004), em virtude das não linearidades da mecânica da fratura que tem sido incorporada, cada vez mais frequente, no estudo da fadiga do concreto.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

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

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

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

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

O clima de Brasília é o tropical com estação seca de inverno (Aw) de acordo com a classificação climática de Koppen-Geiger, com um verão bastante úmido e chuvoso e um inverso seco e, relativamente, frio. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a temperatura média anual é de 20,6 °C, sendo setembro o mês mais quente com temperatura média de 21,7 °C e julho, o mês mais frio com temperatura média de 18,3 °C. Porém, a temperatura varia de forma significativa nas áreas menos urbanizadas, onde a temperatura média das mínimas de inverno cai para cerca de 10 °C a 5 °C. A umidade relativa do ar é de, aproximadamente, 70%, podendo chegar aos 20% ou menos durante o período de inverno.

Conforme os registros do INMET referentes ao período de 1961 a 2013, a menor temperatura já registrada em Brasília foi de 1,6 °C em 18 de julho de 1975, e a máxima histórica nesse mesmo período atingiu 35,8 °C em 28 de outubro de 2008. Com relação ao índice pluviométrico na cidade de Brasília - DF, os maiores acumulados de chuva registrados em 24 horas, no período de 1961 a 2013, o maior acumulado mensal foi de 602,4 mm em janeiro de 1979.

A variação da temperatura no dia 28/10/2008 em Brasília - DF, cujo valor máximo registrado foi de 34,9 °C às 17 horas UTC (*Universal Time Coordinated*), o que corresponde às 14 horas horário oficial de Brasília - DF.

O modelo numérico utilizado para as análises deste trabalho foi construído no programa de análise estrutural em elementos finitos Midas FEA (*Advanced Nonlinear and Detail Analysis System*). A Figura 12 representa a discretização em elementos finitos de uma estrutura de revestimento cerâmico. Para essa discretização utilizou-se os elementos sólidos (3D) Isoparamétricos em que se utiliza de elementos de contato para interligação entre as diferentes camadas do sistema, assim como inserção particular das características físicas distintas, de maneira a permitir as transferências de tensões térmicas.

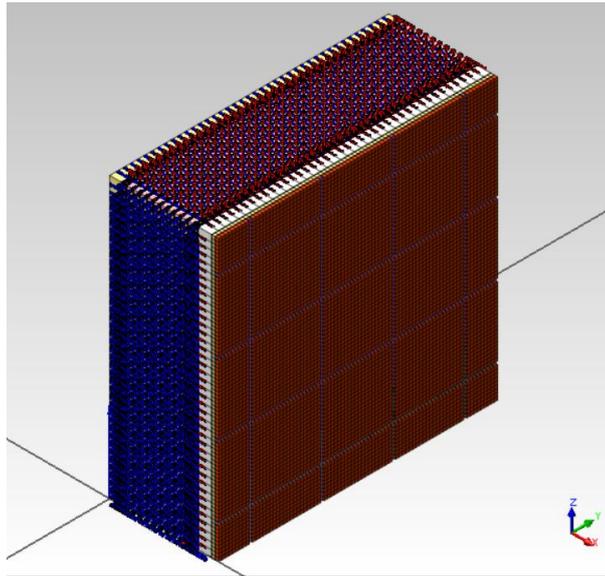


Figura 12 – Condição de contorno para análise termomecânica no Midas FEA.

Para a análise térmica do sistema de revestimento cerâmico foi considerado dois tipos de cerâmica para o revestimento, sendo uma clara e outra escura. O coeficiente de absorção térmica, para a cerâmica de cor clara é de 0,45 e para a cerâmica da cor escura é de 0,95 Thomaz (1989).

As Figuras 13, 14, 15 e 16 apresentam a variação das temperaturas nas interfaces do sistema de revestimento cerâmico ao longo das 24h do dia, considerando a tonalidade da cerâmica (clara e escura) e a temperatura interna (tint) do ambiente (18°C e 25°C), conforme Saraiva (1998) e Uchoa (2007). Assim sendo, a Figura 13 mostra o transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica clara e temperatura interna (tint) do ambiente de 18°C. A Figura 14 mostra o transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica clara e temperatura interna (tint) do ambiente de 25°C. A Figura 14 mostra o transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica escura e temperatura interna (tint) do ambiente de 18°C. Por fim, a Figura 13 mostra o transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica escura e temperatura interna (tint) do ambiente de 25° C. Nas Figuras 13 a 16 apresenta-se a variação da temperatura externa (text), da temperatura interna (tint) e da temperatura nas interfaces cerâmica/argamassa colante (tC/AC), argamassa colante/emboço (tAC/E), emboço/substrato (tE/S) e substrato/reboco interno (tS/R).

Para o estudo da análise numérica será adotado a mesma metodologia empregada no trabalho de Uchôa, 2007, ou seja, a utilização de vários cenários (estudos de casos) para a avaliação do comportamento do sistema de revestimento cerâmico com relação à análise das tensões atuantes nesse sistema. Esses cenários foram definidos e representados pela combinação de argamassa colante industrializada do Tipo ACII, da tonalidade da cerâmica do sistema de revestimento com cerâmica clara e cerâmica escura, do transiente térmico ao longo do dia respectivamente (transiente-1, transiente-2, transiente-3 e transiente-4) e da temperatura interna média adotada de 18°C e 25°C. A Figura 4.3 apresenta os cenários de casos que foram estudados para a análise da fadiga do sistema de revestimento cerâmico usando a abordagem da análise numérica, conforme Tabela 1.

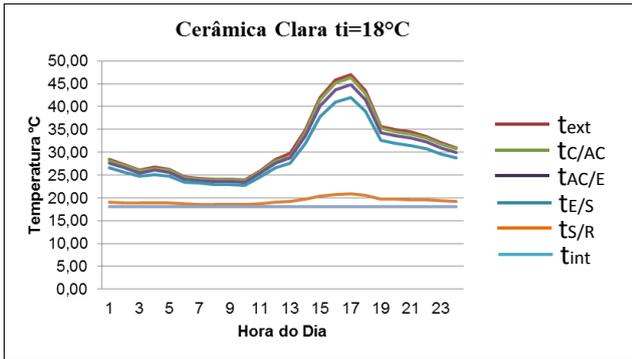


Figura 13 – Transiente térmico na superfície externa do sistema de revest. para a cerâmica clara e temperatura interna do ambiente de 18° C – Transiente 1.

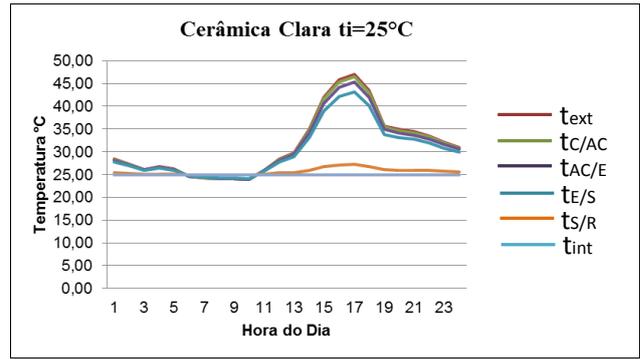


Figura 14 - Transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica clara e temperatura interna do ambiente de 25° C – Transiente 2.

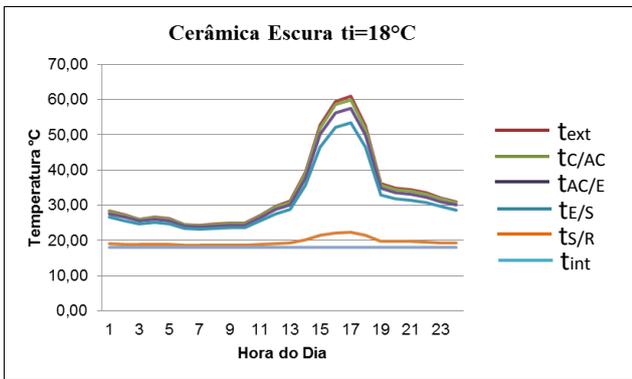


Figura 15 - Transiente térmico na superfície externa do sistema de revest. para a cerâmica escura e temperatura interna do ambiente de 18° C – Transiente 3.

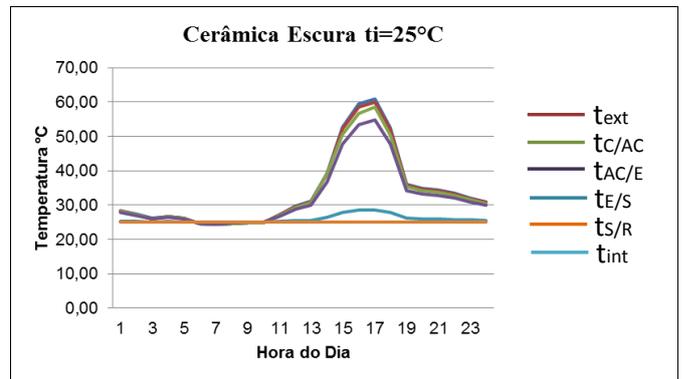


Figura 16 - Transiente térmico na superfície externa do sistema de revestimento para a cerâmica escura e temperatura interna do ambiente de 25° C – Transiente 4.

Tabela 1 - Estudo dos casos que serão analisados na análise numérica no MIDAS FEA.

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

5 RESULTADOS

Apresenta-se então os principais resultados das análises de tensão e de fadiga do sistema de revestimento cerâmico para os quatro casos de estudo mostrados na Tabela 1. Esses casos consideram a temperatura interna do ambiente de 18°C e 25°C e as tonalidades das cerâmicas sendo clara e escura. Além disso, nesses quatro casos são analisadas as tensões considerando-se a temperatura mínima e máxima do revestimento cerâmico externo medidas às 7h e 17h, respectivamente, e obtidas a partir do cálculo dos transientes térmicos analisados.

5.1 Caso 1

A Figura 17 e 18 apresentam a distribuição de tensões S_x obtidas na análise numérica para os nós que representam as diversas camadas dos materiais que compõem o sistema de revestimento cerâmico, em horários de temperatura mínima e máxima, no caso, os horários de 7h e 17h, respectivamente. Pode-se verificar que estas tensões são de compressão, devido à influência da condição de contorno de confinamento adotada nos eixos “y e z”. Essa condição é conservadora e se ajusta bem a sistemas de revestimentos confinados por vigas e colunas, o que é comum nas edificações. Importante destacar, ainda, que no período do dia entre 7h e 17h existe a influência da radiação solar (I_g) o sistema de revestimento cerâmico de fechada.

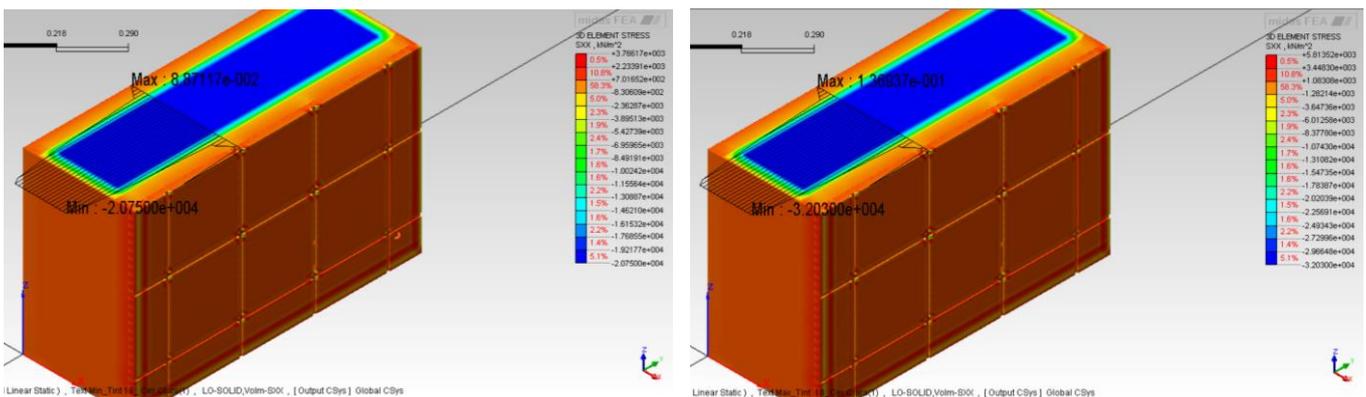


Figura 17 - Caso 1: Tensão S_x do modelo numérico às 7h. Figura 18 - Caso 1: Tensão S_x do modelo numérico 17h.

Observa-se que a tensão S_y na camada que representa a cerâmica (nó 1) foi de 0,48 kN/cm² às 7h e de 0,74 kN/cm² às 17h. Isso representa uma tensão de tração devido à deformação da placa cerâmica provocado pela temperatura externa e a condição de contorno em “y e z”. Em seguida, observa-se que as tensões nos demais nós do modelo numérico que representa o sistema de revestimento cerâmico se comportam como compressão devido ao confinamento das interfaces.

Assim como ocorreu na tensão S_x do Caso 1, observa-se nas Figuras 19 e 20 que a tensão S_y , tanto às 7h quanto às 17h, permaneceu constante na região que representa a camada de substrato no modelo numérico e com os mesmos valores registrados para a tensão S_x , ou seja, -2,08 kN/cm² às 7h e -3,20 kN/cm² às 17h. Entretanto, são nesses nós do modelo numérico que se observa a maior variação de tensão S_y nos horários de 7h e 17h.

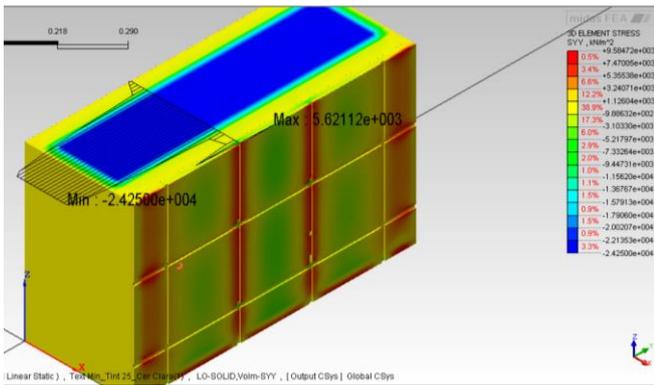


Figura 19 - Caso 1: Tensão Sy do modelo numérico às 7h.

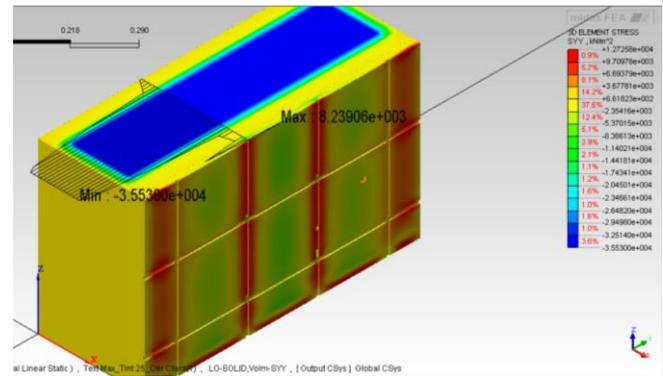


Figura 20 - Caso 1: Tensão Sy do modelo numérico às 17h.

Observa-se que a tensão Sz na camada que representa a cerâmica foi de 0,48 kN/cm² às 7h e de 0,74 kN/cm² às 17h. Isso representa uma tensão de tração devido à deformação da placa cerâmica provocado pela temperatura externa e condição de contorno em “y e z”. Em seguida, observa-se que as tensões nos demais nós do modelo numérico que representa o sistema de revestimento cerâmico se comportam como compressão devido ao confinamento das interfaces.

Assim como ocorreu na tensão Sy do Caso 1, observa-se que a tensão Sz, tanto às 7h quanto às 17h, permaneceu constante na região que representa a camada de substrato no modelo numérico e com os mesmos valores registrados para a tensão Sy, ou seja, -2,08 kN/cm² às 7h e -3,20 kN/cm² às 17h. Entretanto, são nesses nós do modelo numérico que se observa a maior variação de tensão Sz nos horários de 7h e 17h.

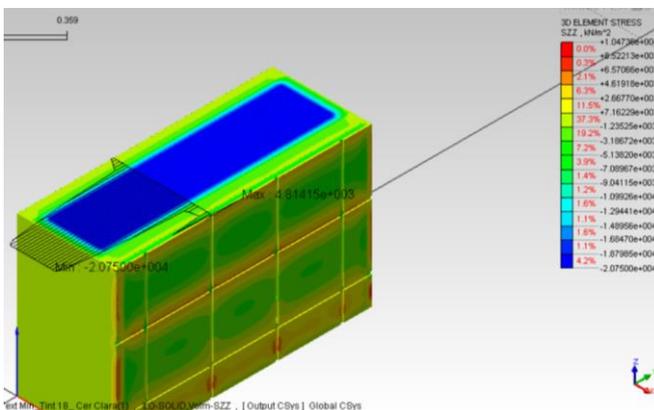


Figura 21 - Caso 1: Tensão Sz do modelo numérico às 7h

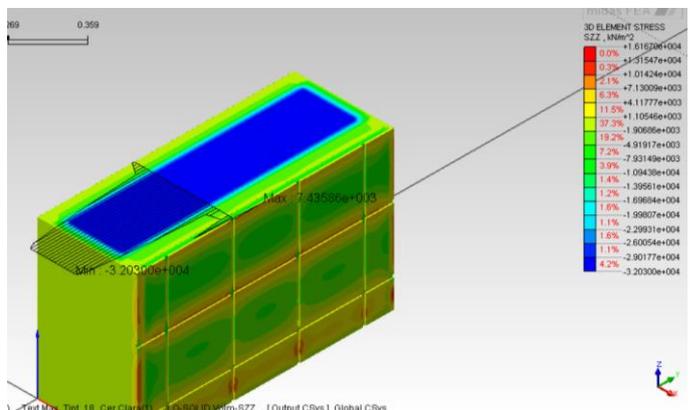


Figura 22 - Caso 1: Tensão Sz do modelo numérico às 17h.

A Figura 23 mostra o comportamento das tensões de cisalhamento Sxy para os nós do modelo numérico do sistema de revestimento cerâmico essas tensões de cisalhamento são provocadas pela deformação na cerâmica causada pela temperatura externa, considerando as temperaturas de 7h e 17h do dia.

As Figuras 23 e 24 representam a deformada e a tensão equivalente de Von-Mises na região de interesse mostrada. Nota-se uma grande tração na região do rejunte com a cerâmica e, como consequência, um nível mais elevado de concentração de tensão, também, na vizinhança do rejunte.

ANÁLISE DE TENSÕES INTERNAS EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS DE FACHADAS NO DISTRITO FEDERAL DEVIDO A CARREGAMENTOS TÉRMICOS UTILIZANDO MODELAGEM MEF 3D

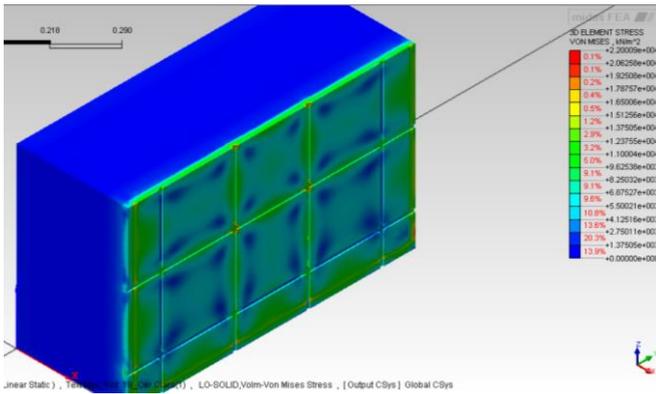


Figura 23 - Caso 1: Deformações na cerâmica com o rejunte.

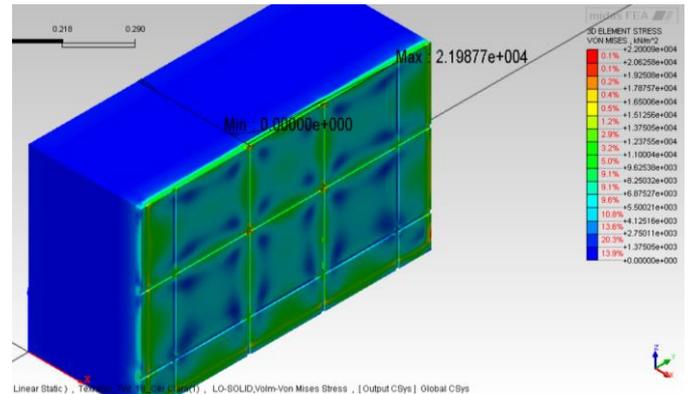


Figura 24 - Caso 1: Tensão de Von Mises.

5.2 Caso 2

Nestas caso ocorreu acentuada variação da tensão S_x entre as camadas da cerâmica até o início do substrato, às 7h observou-se que a tensão inicial de $-1,01 \text{ kN/cm}^2$ diminuiu para $-0,02 \text{ kN/cm}^2$ no início do emboço. Em seguida, a tensão começa a aumentar até o substrato e continua constante ainda no substrato, conforme citado anteriormente. Por fim, a partir do substrato até o reboco, a tensão diminui de $-2,43 \text{ kN/cm}^2$ até chegar a 0 kN/cm^2 . De forma análoga, às 17h observou-se que a tensão S_x inicial era $-1,48 \text{ kN/cm}^2$ na cerâmica escura diminuiu para $-0,03 \text{ kN/cm}^2$ no emboço. Em seguida, a tensão começa a aumentar até o substrato e continua constante até a zona central do substrato, conforme citado anteriormente, conforme as Figuras 25 e 26.

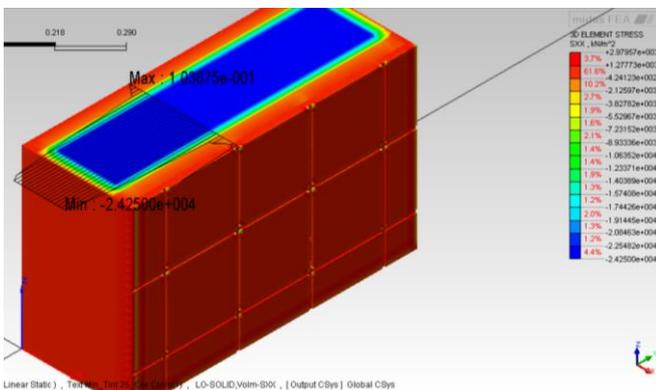


Figura 25 - Caso 2: Tensão S_x do modelo numérico às 7h.

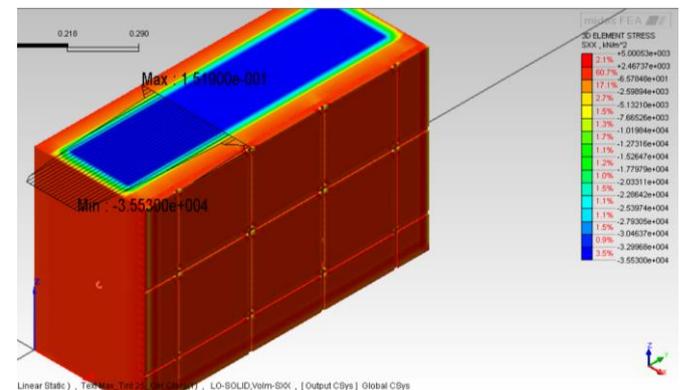


Figura 26 - Caso 2: Tensão S_x do modelo numérico às 17h.

Observa-se que a tensão S_y na camada que representa a cerâmica foi de $0,56 \text{ kN/cm}^2$ às 7h e de $0,82 \text{ kN/cm}^2$ às 17h. Isso representa uma tensão de tração devido à deformação da placa cerâmica provocado pela temperatura externa. Em seguida, observa-se que as tensões nos demais nós do modelo numérico se comportam como compressão devido ao confinamento das interfaces.

Assim como ocorreu com a variação de tensão S_x do Caso 2, observa-se que a tensão S_y , tanto às 7h quanto às 17h, permaneceu constante nas camadas de substrato do modelo numérico e com os mesmos valores registrados para a tensão S_x , ou seja, $-2,43\text{kN/cm}^2$ às 7h e $-3,55\text{ kN/cm}^2$ às 17h. Entretanto, são nesses nós do modelo numérico que se observa a maior variação de tensão S_y nos horários de 7h e 17h. Figuras 27 e 28.

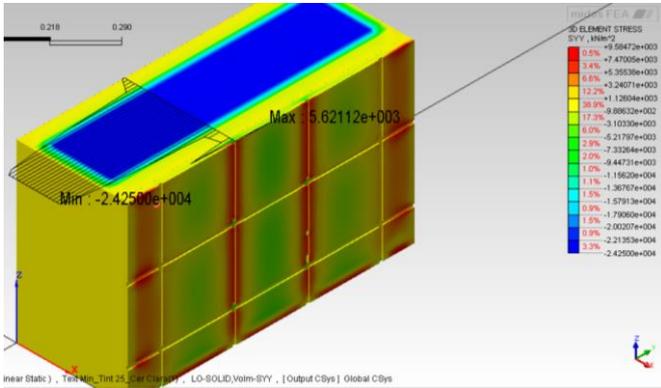


Figura 27 - Caso 2: Tensão S_y do modelo numérico às 7h.

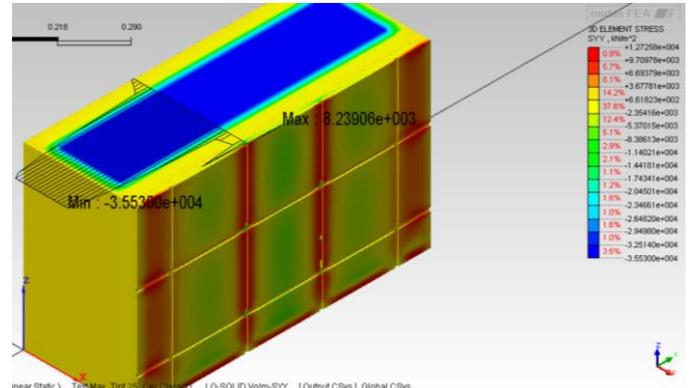


Figura 28 - Caso 2: Tensão S_y do modelo numérico às 17h.

Já na tensão S_z na camada que representa a cerâmica foi de $0,56\text{ kN/cm}^2$ às 7h e de $0,82\text{ kN/cm}^2$ às 17h. Isso representa uma tensão de tração devido à deformação da placa cerâmica provocado pela temperatura externa e do confinamento adotada nos eixos “y e z”. Em seguida, observa-se que as tensões nos demais nós do modelo numérico se comportam como compressão devido ao confinamento das interfaces.

Assim como ocorreu com a variação de tensão S_y do Caso 2, observa-se que a tensão S_z , tanto às 7h quanto às 17h, permaneceu constante nas camadas do substrato do modelo numérico e com os mesmos valores registrados para a tensão S_x , ou seja, $-2,43\text{kN/cm}^2$ às 7h e $-3,55\text{ kN/cm}^2$ às 17h. Entretanto, são nesses nós do modelo numérico que se observa a maior variação de tensão S_z nos horários de 7h e 17h.

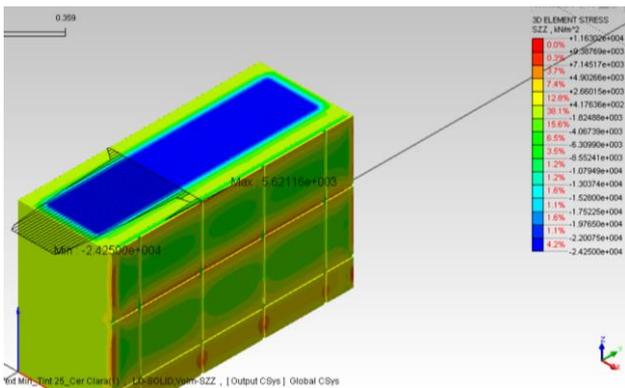


Figura 29 - Caso 2: Tensão S_z do modelo numérico às 7h.

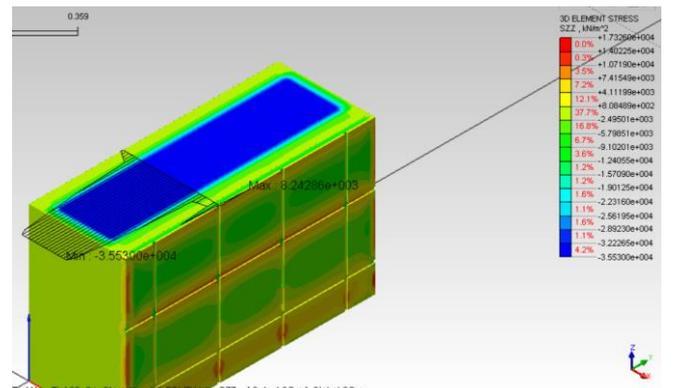


Figura 30 - Caso 2: Tensão S_z do modelo numérico às 17h.

As Figuras 31 e 32 representam a deformada e a tensão equivalente de Von-Mises na região de interesse. Nota-se uma grande tração na região do rejunte com a cerâmica e, como consequência, um nível mais elevado de concentração de tensão, também, na vizinhança do rejunte.

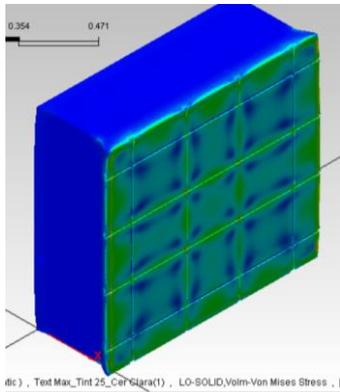


Figura 31 - Caso 2: Deformações na cerâmica com o rejunte.

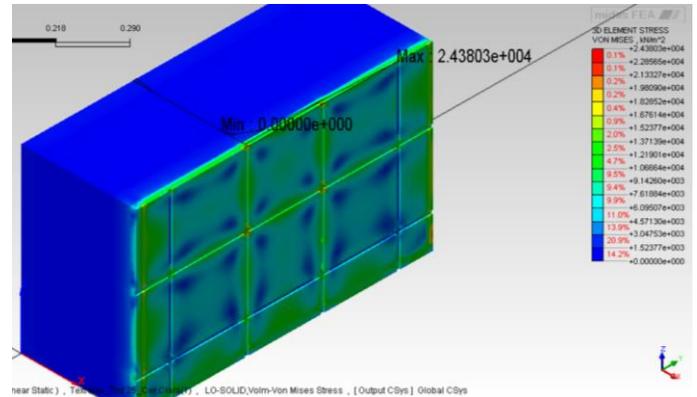


Figura 32 - Caso 2: Tensão de Von Mises.

5.3 Caso 3

A Figura 33 e 34 apresenta as variações das tensões S_x às 7h e 17h para o Caso 3 obtidas na análise numérica para os nós que representam as diversas camadas dos materiais que compõem o sistema de revestimento cerâmico. De forma semelhante aos Casos 1 e 2, observa-se que há a predominância de tensões de compressão, devido à influência da condição de contorno de confinamento adotada nos eixos “y e z”.

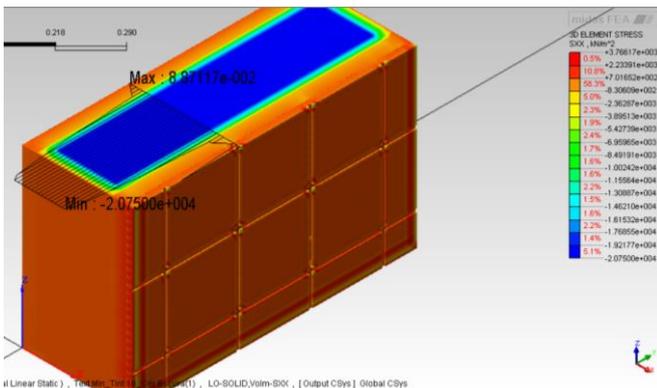


Figura 33 - Caso 3: Tensão S_x do modelo numérico às 7h.

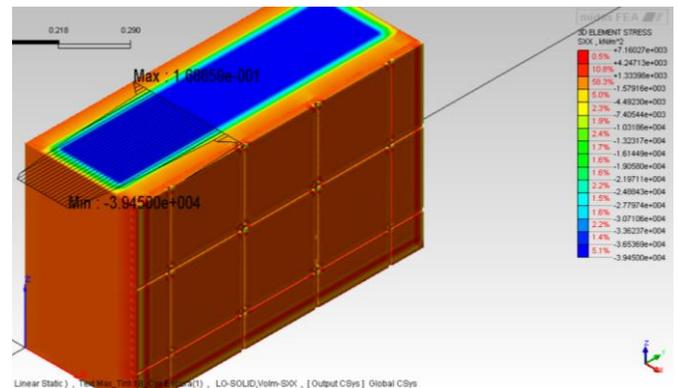


Figura 34 - Caso 3: Tensão S_x do modelo numérico às 17h.

Assim como ocorreu na tensão S_x deste Caso 3, observa-se que a tensão S_y , tanto às 7h quanto às 17h, permaneceu constante entre os nós que representam a camada de substrato no modelo numérico e com os mesmos valores registrados para a tensão S_x , ou seja, $-2,08 \text{ kN/cm}^2$ às 7h e $-3,95 \text{ kN/cm}^2$ às 17h. E, são nesses nós do modelo numérico que se observa a maior variação de tensão S_y nos horários de 7h e 17h, Figuras 35 e 36.

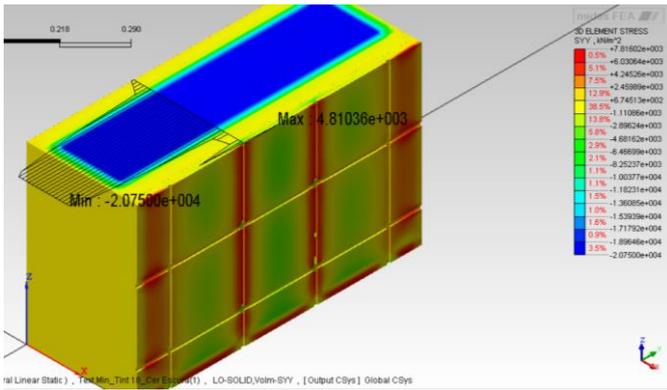


Figura 33 - Caso 3: Tensão Sy do modelo numérico às 7h.

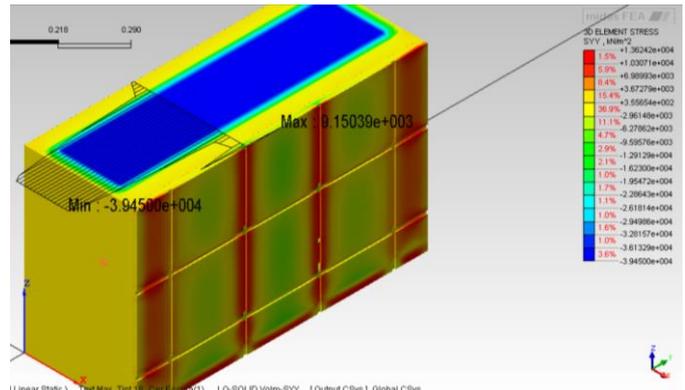


Figura 34 - Caso 3: Tensão Sy do modelo numérico às 17h.

Observa-se nas Figuras 35 e 36 que a tensão Sz na camada que representa a cerâmica escura foi de 0,48 kN/cm² às 7h e de 0,92 kN/cm² às 17h. Isso representa uma tensão de tração devido à deformação da placa cerâmica provocado pela temperatura externa e o confinamento nos eixos “y e z”. Em seguida, observa-se que as tensões nos demais nós do modelo numérico que representa o sistema de revestimento cerâmico se comportam como compressão devido ao confinamento das interfaces.

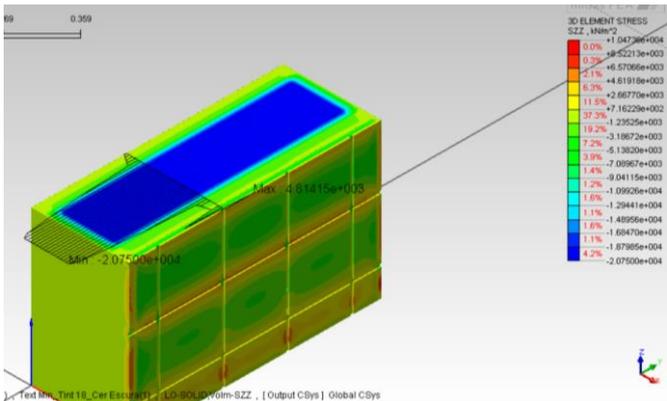


Figura 35 - Caso 3: Tensão Sz do modelo numérico às 7h.

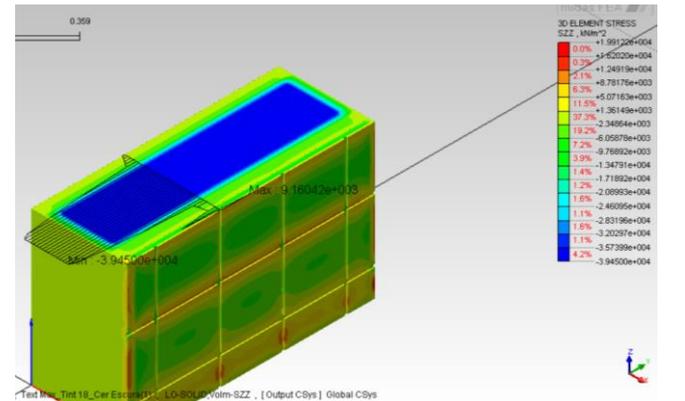


Figura 36 - Caso 3: Tensão Sz do modelo numérico às 17h.

As Figuras 37 e 38 representam a deformada e a tensão equivalente de Von-Mises na região de interesse mostrada. Nota-se uma grande tração na região do rejunte com a cerâmica e, como consequência, um nível mais elevado de concentração de tensão, também, na vizinhança do rejunte.

ANÁLISE DE TENSÕES INTERNAS EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS DE FACHADAS NO DISTRITO FEDERAL DEVIDO A CARREGAMENTOS TÉRMICOS UTILIZANDO MODELAGEM MEF 3D

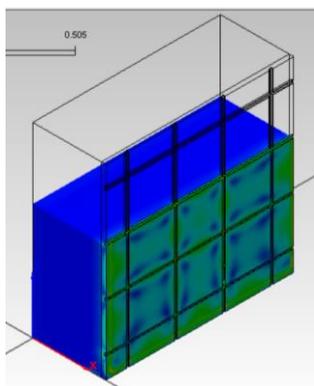


Figura 37 - Caso 3: Deformações na cerâmica com o rejunte.

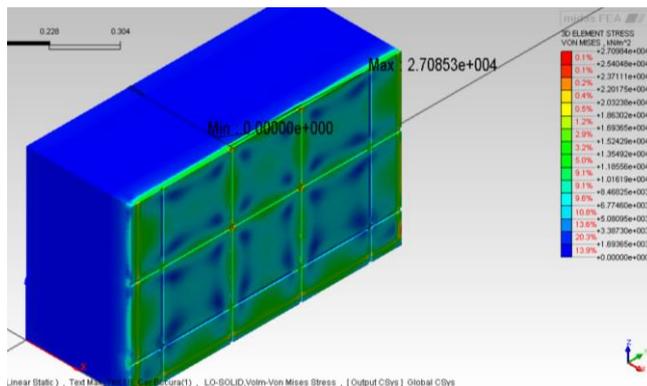


Figura 38 - Caso 3: Tensão de Von Mises.

5.4 Caso 4

Os valores da tensão S_x nos horários de 7h e 17h para o Caso 4 (cerâmica escura e temperatura interna de 25°C). Observa-se que a tensão S_x , tanto às 7h quanto às 17h, permanece constante na camada de substrato no modelo numérico. Ou seja, a tensão S_x nesses nós corresponde à -2,43 kN/cm² às 7h e -4,30 kN/cm² às 17h. Entretanto, são nesses nós do modelo numérico que se observa a maior variação de tensão S_x nos horários de 7h e 17h, igualmente ao que foi observado nesses mesmos nós nos Casos 1, 2 e 3.

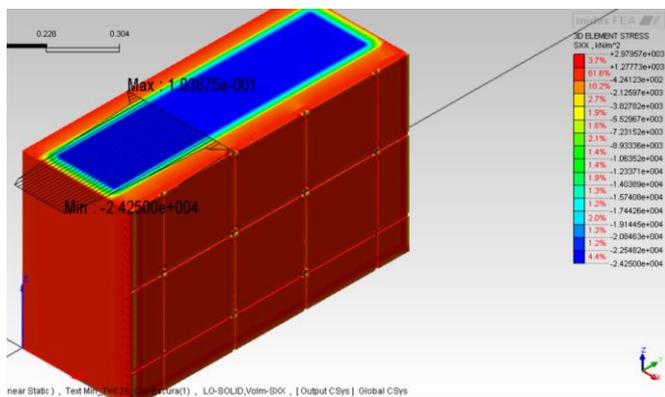


Figura 39 - Caso 4: Tensão S_x do modelo numérico às 7h.

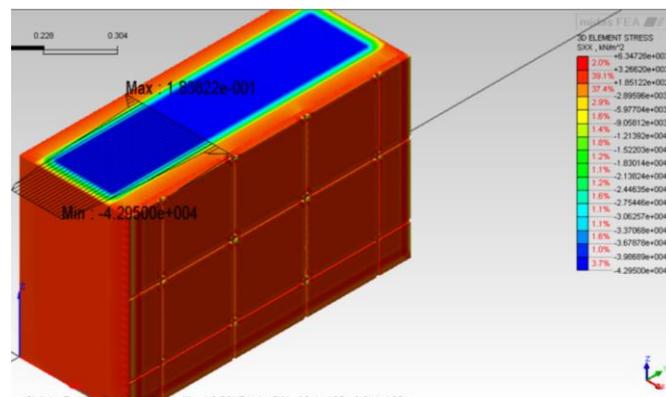


Figura 40 - Caso 4: Tensão S_x do modelo numérico às 17h.

A tensão S_y , tanto às 7h quanto às 17h, permaneceu constante no substrato e com os mesmos valores registrados para a tensão S_x do Caso 4, ou seja, -2,43 kN/cm² às 7h e -4,30 kN/cm² às 17h. Conforme apresentado nas Figuras 41 e 42, onde modelo numérico que se observa a maior variação de tensão S_y nos horários de 7h e 17h.

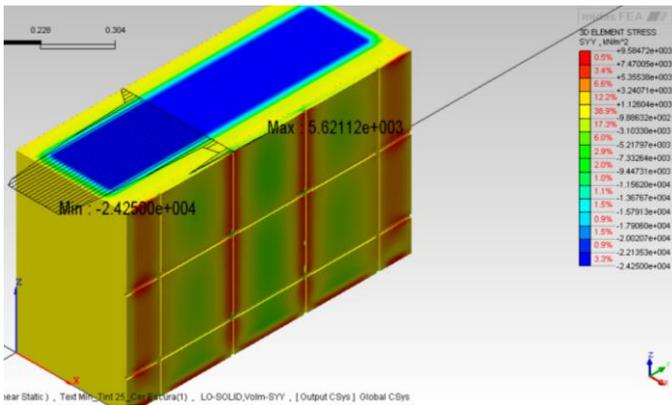


Figura 41 - Caso 4: Tensão Sy do modelo numérico às 7h.

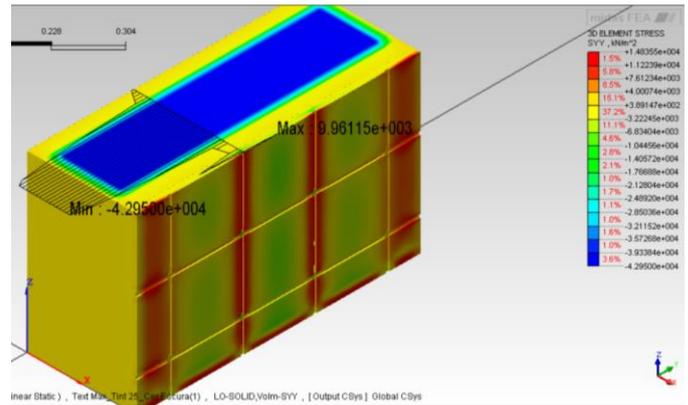


Figura 42 - Caso 4: Tensão Sy do modelo numérico às 17h.

Os resultados obtidos no Caso 4 para as tensões normais ao longo do eixo “z” nos nós do modelo numérico às 7h e 17h do dia são mostrados na Figura 43 e 44.

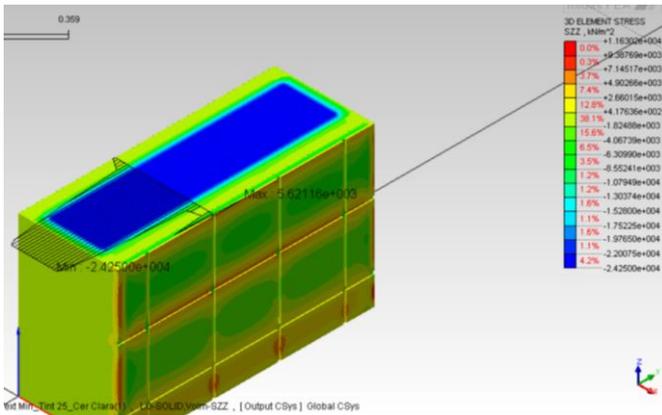


Figura 43 - Caso 4: Tensão Sz do modelo numérico às 7h.

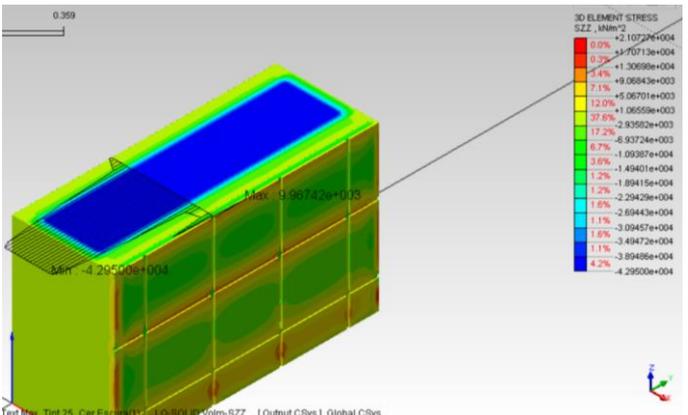


Figura 44 - Caso 4: Tensão Sz do modelo numérico às 17h.

As tensões de Von Mises e as deformações apresentaram idênticas ao caso 3.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

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

As tensões S_x observadas no sistema de revestimento cerâmico como resultado da análise numérica para os quatro casos de estudo, foram predominantemente de compressão, enquanto as tensões S_y registradas na cerâmica foram predominantemente de tração e, para as demais regiões do modelo numérico simplificado em EF, a tensão S_y observada foi de compressão. Além disso, devido ao confinamento do substrato na estrutura da malha discretizada do modelo numérico, as tensões S_x , S_y , S_z e S_{xy} foram constantes na camada de substrato.

Conforme apresentado nos gráficos do Capítulo 6 sobre as variações de tensão S_x , S_y , S_z e S_{xy} para os quatro casos analisados pelo modelo numérico aplicado no programa MIDAS FEA, observa-se que a curva de variação de tensões tem o mesmo comportamento para todos os quatro casos, mas com valores dessas tensões distintos para cada caso. Entretanto, vale destacar que as tensões S_x , S_y , S_z e S_{xy} observadas às 7h do dia para os casos 1 e 3, assim como, para os casos 2 e 4 se mostraram iguais em cada um dos pontos do modelo numérico que representou o sistema de revestimento cerâmico. Isso se deve ao fato que às 7h do dia as temperaturas externas na superfície das cerâmicas clara e escura são iguais conforme apresentado. Dessa forma, conclui-se que, para o modelo numérico adotado e considerando às 7h do dia, a tonalidade da cerâmica (clara e escura) não foi um fator que influenciou nos resultados de tensões obtidas, pois foram geradas as mesmas tensões às 7h para a cerâmica clara (caso 1) e cerâmica escura (caso 3) e temperatura interna de 18°C. Da mesma maneira, as tensões obtidas às 7h do dia para a cerâmica clara (caso 2) e cerâmica escura (caso 4) e considerando a temperatura interna de 25°C, foram as mesmas. Assim sendo, pela análise numérica realizada, conclui-se que, apenas a temperatura interna de 18°C e de 25°C adotada nos casos de estudo influenciou na geração de tensões distintas para os quatro casos estudados às 7h do dia.

Isso não ocorre com os valores de tensões S_x , S_y , S_z e S_{xy} medidos às 17h para os mesmos casos de estudo, onde as tensões observadas em cada caso foram diferentes. Ou seja, as tensões registradas para a cerâmica escura foram aproximadamente 20% maior que as tensões registradas para a cerâmica clara, comparando-se os casos 1 com 3 e os casos 2 com 4. Assim, observamos que a tonalidade da cerâmica influenciou com uma taxa de 20%, as tensões produzidas no modelo considerando às 17h do dia e a temperatura interna de 18°C (casos 1 e 3) e 25°C (casos 2 e 4).

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

REFERÊNCIAS

- CAMPANTE, E. F. & BAÍA, L. L. M. *Projeto e Execução de revestimento Cerâmico CTE*, Primeiros Passos da qualidade no Canteiro de Obra, O Nome da Rosa, São Paulo, SP, 2003.
- CARASEK, H.. *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. São Paulo, IBRACON, 2007.
- CHAGAS, S. V. M. (2009). "*Estudo e proposta de um modelo de resistência à fadiga de argamassa de revestimento em estado plano e tridimensional de tensões*", Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- CHEW, M. Y. L. (1992). *The Study of Adhesion Failure of Wall Tiles. Building and Environment*, v 27, nº 4, pp 493-499.
- FIORITO, A. J. S. I. *Manual de Argamassa e Revestimento – Estudo e Procedimento de Execução*. Editora Pini. São Paulo, SP, 1994.
- JUNGINGER, MAX (2003). *Rejuntamento de Revestimento Cerâmico: Influência das Juntas de Assentamento na Estabilidade de painéis*. Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 141p.
- MAGNABOSCO, R. *Técnicas de Ensaio para Previsão da Vida em Fadiga de Liga de Alumínio AA7175*, LabMat - FEI - Faculdade de Engenharia Industrial, 2000.
- SARAIVA, A. G. *Contribuição ao Estudo de Tensões de Natureza Térmica em Sistema de Revestimento Cerâmico de Fachada*. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1999.
- THOMAZ, E. "*Trincas em Edifícios - causas, prevenção e recuperação.*" Co-edição IPT/EPUSP/PINI. São Paulo, SP, 1989.

ANÁLISE DE TENSÕES INTERNAS EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS DE FACHADAS NO
DISTRITO FEDERAL DEVIDO A CARREGAMENTOS TÉRMICOS UTILIZANDO MODELAGEM MEF 3D

- UCHÔA, J. C. B, *Procedimento Numérico e Experimental para a Avaliação da Resistência à Fadiga de Sistema de Revestimento*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Estrutura e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2007, 159p.