

Araújo, V.B. <sup>1</sup>; Costa, J. P. S. <sup>2</sup>

*Graduandos, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil*

Oliveira Jr., L. A. O. <sup>3</sup>

*Professor Dr., Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil*

<sup>1</sup> vitorbelo11@hotmail.com; <sup>2</sup> jpsc97@outlook.com; <sup>3</sup> alvarojunior@pucgoias.edu.br

**RESUMO:** Fachadas de concreto são um sistema de vedação vertical externa que, por estarem expostas, recebem incidência direta de calor, e outros agentes climáticos. Por isso o presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento mecânico de uma fachada de concreto submetida à ação de temperaturas típicas do clima de Goiânia. Para isso foram utilizados os módulos “*structural analysis*” e “*heat-flow staggered stresses 2D*” com auxílio do método dos elementos finitos no software Diana. Os resultados das análises mostraram influência da geometria, da posição das aberturas e da vinculação na distribuição do calor na fachada, embora as tensões tenham sido afetadas somente pela geometria e pela posição das aberturas.

*Palavras-chaves: Concreto, Temperatura, Fachadas, Fluxo de Calor.*

**Área de Concentração:** 02 – Estruturas.

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é até os dias atuais um material bastante utilizado na construção civil. Composto por cimento, agregado graúdo (brita), agregado miúdo (areia), água, eventualmente alguns aditivos, adições minerais e ainda produtos para casos que se busca potencializar seu desempenho conforme a demanda de uso, é um material em constante evolução, que recebe ainda bastante empenho da comunidade científica em seu desenvolvimento.

No endurecimento do concreto pode-se destacar principalmente as suas características quanto às resistências mecânicas na tração e na compressão. O concreto simples não se comporta bem quando solicitado ao esforço de tração, de modo que, por esta razão, na maioria das vezes não se considera essa resistência nos cálculos. Por isso utiliza-se o aço para promover a resistência a esse tipo de esforço e conferir a ductilidade que o material não apresenta dada a sua natureza frágil. Por outro lado, apresenta boa resistência à compressão, sua principal característica, que pode ser determinada pela ruptura de corpos de prova cilíndricos expostos à compressão centrada. Por meio deste ensaio

obtem-se valores de resistência à compressão e seu módulo de elasticidade. No Brasil utilizam-se corpos de prova de base e altura, respectivamente, de 15 cm por 30 cm e 10 cm por 20 cm.

Outro material amplamente consumido na construção civil é o aço que apresenta elevadas resistências na tração e na compressão, bem como elevada ductilidade e tenacidade, entre outras propriedades. Sua resistência à tração é obtida a partir de ensaios de tração uniaxial dos quais se obtém a resistência característica à tração ( $f_{yk}$ ) e a tensão de escoamento, valor de tensão em que as deformações são permanentes. Este material, quando unido ao concreto, resulta em um material composto conhecido como concreto armado, que é uma combinação muito interessante empregada amplamente nas obras civis no mundo. Esse material alia o melhor dos dois sistemas, a boa resistência aos esforços de compressão do concreto e a elevada resistência à tração do aço.

O aço e o concreto trabalham de forma solidária graças à boa aderência entre os dois materiais, sobretudo se forem utilizadas barras de aço com nervuras para melhorar as condições de aderência mecânica,

garantindo o bom desempenho do concreto armado em variadas situações de projeto, tornando-o um dos principais materiais de construção civil na atualidade.

Segundo Neville (2016) tendo em vista a influência da temperatura no estado fresco do concreto, nota-se que tanto a temperatura de lançamento e adensamento, quanto a cura tem bastante importância e afetam os valores de resistência. Neville (2016) explica que a elevação das temperaturas acelera as reações de hidratação do cimento, trazendo benefícios à resistência inicial do material sem comprometer sua resistência final. No entanto, o mesmo autor esclarece que se excessiva, a temperatura pode reduzir a duração do tempo de pega, de tal maneira que toda a estrutura da pasta se estabilize precocemente, o que pode ser prejudicial ao comportamento esperado do concreto.

Neville (2016) afirma que embora temperaturas elevadas durante as etapas de lançamento e cura do concreto possam trazer efeitos positivos à resistência do material nas primeiras idades, efeitos adversos podem ocorrer sobre a resistência a partir dos 7 dias. De acordo com Neville (2016) a rápida hidratação inicial favorece a formação de produtos de reação com pior estrutura física e provavelmente mais porosos, o que significa que parte dos poros permanecerá sempre vazia. Por consequência, de acordo com a regra da relação gel/espaco, isso implicará em resistência menor do que a de uma pasta de cimento menos porosa, embora de hidratação lenta, na qual eventualmente se obtém uma relação gel/espaco elevada.

Quanto ao concreto já endurecido Silva (2013) afirma que apesar do concreto apresentar boas propriedades térmicas, como, baixa condutividade térmica, a não emissão de gases tóxicos e fato de não ser um bom comburente, quando sofre influência de elevadas temperaturas ocorre no material algumas mudanças quanto a macroestrutura e microestrutura, levando em conta quesitos físicos, químicos e mecânicos.

Diante desse fato o referido trabalho pretende analisar o comportamento de uma fachada executada em concreto armado sob ação de temperaturas típicas das fachadas dos edifícios de múltiplos pavimentos nos grandes centros urbanos, como é o caso de Goiânia. Deve-se destacar que a exposição dessas fachadas aos sucessivos ciclos de elevação e redução da temperatura ao longo do dia, algumas vezes concomitantemente à presença de chuva e/ou vento, podem desencadear manifestações patológicas nas fachadas que eventualmente poderão comprometer o desempenho de outros sistemas de edificações.

O presente trabalho tem como objetivo usar o método de elementos finitos para avaliar o comportamento mecânico de uma fachada de concreto submetida a temperaturas típicas do uso desse sistema de vedação

vertical externa que aquela considerada como temperatura ambiente.

De acordo com Alves (2008) as fachadas estão entre os sistemas de uma edificação que apresentam o maior índice de manifestações patológicas (16%) se comparados a outros elementos, perdendo apenas para as fundações (20%). O mesmo autor explica que o maior causador desses problemas patológicos é o erro na execução e que por causa desse erro a recuperação chega a ser duas vezes e meia mais cara do que a reparação de outros tipos de problemas. Entre as manifestações patológicas mais comumente observadas nas fachadas com até 40 anos de idade, pode-se citar o descolamento (63%) de revestimento cerâmico, o deslocamento de revestimentos cerâmicos (5%), as falhas no rejunte (20%), as fissuras (11%), a eflorescência (menos de 1%) e as falhas de vedação (1%), algumas delas causadas ou agravadas pela variação constante de temperatura e umidade nas fachadas.

Considerando esses aspectos, e a escassez de trabalhos na literatura técnica que abordem o tema de maneira integrada, é importante analisar a ação simultânea das variações de temperatura, da umidade e dos carregamentos que solicitam a estrutura para compreender as consequências dessas ações para propor soluções que atenuem a perda de desempenho e assegurem o alcance da vida útil de projeto. Neste sentido, a modelagem computacional é uma ferramenta bastante interessante, já que permite a simulação de diversos cenários distintos, isolados ou não, a um custo relativamente baixo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 *Influência da temperatura*

#### 2.1.1 *Transferência de calor*

Para entender os efeitos da temperatura em um edifício em concreto armado, deve-se antes saber como essa forma de energia (calor) é gerada e transmitida. Segundo Araújo (2019) a transferência de calor ocorre quando existem dois corpos ou mais que possuem temperaturas diferentes entre eles. Com isso, para estabelecer o equilíbrio, o corpo de maior temperatura transfere energia em forma de calor para aqueles de menor temperatura de modo que, no fim, ambos atinjam a mesma temperatura. Essa transferência de calor pode ocorrer de três formas: por condução, por convecção e por radiação.

A transferência de calor por condução é feita entre materiais sólidos por contato direto. A energia do corpo de maior temperatura é transferida para o de menor,

fazendo com que as partículas do material mais “frio” sejam agitadas e sua temperatura seja elevada. Esse fenômeno explica a razão pela qual materiais com boa condutividade elétrica normalmente possuem também boa condutividade térmica. Isso ocorre, pois a transferência por condução nesses materiais é realizada através de elétrons livres, conforme explica Lima (2005).

Já a transferência de calor por convecção é realizada entre um sólido e um fluido (líquido ou gasoso), de tal forma que as partículas do fluido, aquecidas pela superfície quente do sólido, se movimentam em direção a região com menor temperatura, elevando-a, o que gera um ciclo de reaquecimento, de acordo com Lima (2005).

Por sua vez, a transferência de calor por radiação é o mecanismo de transferência de energia em forma de calor realizada por meio de ondas eletromagnéticas, por isso não necessita que os corpos entrem em contato um com o outro, pois tais ondas podem se propagar mesmo no vácuo. Essa energia não é totalmente transmitida de um corpo para o outro por radiação, pois uma parte pode ser refletida conforme alerta Lima (2005). Costa (2008), por sua vez, explica que essa característica dos corpos de transmitir calor por radiação é chamada de emissividade, que tem seu valor variando de 0 a 1, o qual quanto maior, mais capaz de emitir calor por radiação é o material.

Diante disso, com a transferência de calor para as estruturas de concreto decorrente de altas temperaturas, ocorrem mudanças nas micro e macroestruturas do concreto armado sob os pontos de vista físico e químico.

### 2.1.2 *Efeitos térmicos nas micro e macroestrutura do concreto*

Segundo Lima (2005) no âmbito da microestrutura as alterações mais observadas ocorrem nas fases cimentícias nas quais, em decorrência do processo de aquecimento, partículas hidratadas sofrem transformações químicas que acabam por originar novos compostos, por efeito de agregados, armaduras, aplicação ou não de carga durante ensaios e outros fatores.

Silva (2009) afirma que todos os corpos sofrem uma mudança na sua geometria quando submetidos a variações de temperaturas, seja por dilatação ou por contração. No concreto esse comportamento é influenciado pelos coeficientes de dilatação térmica dos vários materiais empregados, como o do aço (no caso de concreto armado ou com fibras), da pasta de cimento, dos agregados entre outros. Em se tratando de concreto armado, considerando a natureza frágil do

concreto, as dilatações do aço tendem a causar fissuras na matriz em função das restrições que o segundo material tende a impor sobre o primeiro.

Araújo (2009) comenta que outra propriedade que tem muita importância no estudo do comportamento do concreto sob variações de temperatura é a difusividade térmica, a qual está relacionada aos agregados utilizados na produção do concreto, e determina a facilidade que o material tem de suportar mudanças de temperatura. Um material bastante empregado no Brasil como agregado para concreto por ter baixa difusividade térmica, possibilitando maior estabilidade térmica se submetido a temperaturas elevadas, é o basalto.

Além das duas últimas propriedades, as variações de temperatura envolvem outra propriedade importante e conhecida, o calor específico, que é a capacidade que o material tem de absorver o calor emitido pelo meio externo. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), no caso do concreto, calor específico é da ordem de  $10^{-5}$ , e essa propriedade, diferentemente da difusividade térmica, não está relacionada aos agregados, mas sim com a umidade, como explica Silva (2009).

A condutividade térmica é outra propriedade relevante no comportamento térmico dos materiais. Segundo Silva (2009) ela expressa a capacidade que o material tem de conduzir calor, característica que está diretamente relacionada tanto aos agregados quanto ao grau de saturação do material, pois concretos com saturação mais baixa e/ou mais leves tendem a apresentar menor condutividade térmica e acabam sendo melhores em ambientes com temperaturas mais elevadas, quando comparados aos concretos convencionais. O valor dessa propriedade no concreto convencional segundo a NBR 15.200 (ABNT, 2004) é de  $1,3 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ .

O fato de o concreto apresentar baixa condutividade térmica faz com que o calor externo emitido de forma excessiva atinja somente as camadas mais externas do mesmo, protegendo as camadas mais internas segundo relatos de Lima (2005).

No ponto de vista macroestrutural, de acordo com Silva (2013), o concreto armado sofre algumas alterações principais devido a constantes mudanças de temperaturas, como por exemplo, perda de resistência mecânica, diminuição do módulo de elasticidade, mudanças na coloração (mais notados nos constituídos de agregados com presença de ferro) e perda da rigidez, comportamentos que associados à heterogeneidade dos materiais geram a degradação das estruturas em etapas.

Já segundo Petrucci (1972), analisando-se o aço, observa-se que pode ocorrer perda considerável de resistência quando são aquecidos, tanto aqueles usados como armadura passiva quanto aqueles utilizados como

fiões e cordoalhas de protensão (armaduras ativas), ou mesmo os cabos das estruturas estaiadas e as catenárias. Mesmo assim a sua resistência pode ser recuperada se houver resfriamento, desde que a temperatura na qual a estrutura cristalina do aço é permanentemente reorganizada não tenha sido atingida.

Cánovas (1988) afirma que quanto ao frio atuando na fase de início de pega, o concreto pode ter seu endurecimento retardado, o que acontece devido à desaceleração das reações de hidratação do cimento. Existem alguns fatores que podem atuar sobre as reações de hidratação do cimento no inverno e, portanto, afetar o concreto produzido nesta estação, como por exemplo: a geada, a neve, a chuva, a umidade e o vento. No caso de uma geada, não só as reações de hidratação se processam de forma mais lenta, como também ocorre o início de congelamento da água a partir de 0 °C, o que resulta em uma expansão do volume em cerca de 9%. A água que se congela, dentro ou fora dos capilares do concreto, gera uma pressão que nesta idade se torna maior do que a resistência do concreto à tração, ocasionando microfaturas internas que levam à perda de coesão do concreto, inclusive com danificação da interface pasta-agregado gráudo, a qual sofrerá pequenas rupturas localizadas rompendo a aderência que existe entre as fases pasta e agregado. Nestes casos a presença do vento contribui de forma negativa potencializando a perda de calor do material, acelerando o congelamento da água. Já para o concreto no estado endurecido, o frio tem uma ação significativa apenas quando o material apresentar uma grande quantidade de vazios, possibilitando que a água penetre nos poros, o que levará a situação de expansão do volume em decorrência do congelamento e conseqüentemente a um aumento de pressão que o material pode não resistir. As microfaturas também ocorrerão neste caso e danificarão a microestrutura do concreto, comprometendo suas propriedades mecânicas de forma geral.

Segundo Cánovas (1988) os efeitos das altas temperaturas sobre o concreto diferem conforme o estado do material. No estado fresco, enquanto as reações de hidratação se processam, a alta temperatura pode trazer benefícios apenas em uma situação de cura acelerada, com uso de vapor de água quente, não ultrapassando 80°C e com uma umidade relativa muito alta ou em saturação. Nessa situação a elevação da temperatura deve se dar de forma lenta, para que após o término da cura, o concreto retorne gradualmente à temperatura ambiente. Desta maneira, pode-se promover um aumento considerável na velocidade das reações de hidratação do cimento que culminam em resistências mais elevadas nas primeiras idades em comparação aos concretos cuja cura se deu em outras condições. Porém, em situações de altas temperaturas e baixas umidades, condições estas bastante comuns no

estado de Goiás, e na cidade de Goiânia, que será o local de estudo deste trabalho, o concreto já passa a estar sujeito a algumas complicações, tais como: o endurecimento prematuro; a rápida evaporação da água, o que pode levar a uma perda de consistência e trabalhabilidade, impedindo a moldagem; tendência à fissuração, sobretudo por retração; aumento da porosidade; redução da durabilidade, diminuição da resistência mecânica, dentre outros fatores. Segundo Cánovas (1998) quando é feita a concretagem em ambientes muito secos, com temperaturas ultrapassando 40°C, deve-se resfriar a água de amassamento e os agregados. Neste caso ainda recomenda-se manter úmidas, durante dez dias no mínimo, as superfícies do concreto para que se proteja a fase de hidratação do cimento e início de endurecimento, evitando a evaporação da água de amassamento e os danos causados pelo fenômeno. O vento seco potencializa o efeito da temperatura elevada, amplificando os efeitos nocivos da evaporação indesejada da água. Tendo em vista o concreto no estado endurecido, Cánovas (1988) explica que em peças de concreto de grande volume a temperatura pode exercer influência de forma considerável nas superfícies expostas, que normalmente apresentam fissuras em decorrência da retração por secagem, principalmente se não forem tomadas medidas para promover a cura do concreto de maneira segura.

Outra situação que merece destaque é aquela na qual se encontram os edifícios residenciais, cujas fachadas, durante boa parte do dia, são expostas a altas temperaturas externas com temperaturas internas bem menores, o que pode resultar em fissurações devido a dilatação térmica diferencial que o concreto e os componentes da fachada venham a sofrer.

## 2.2 Fachadas de Concreto

Tendo em vista todas as características do concreto citadas, é necessário analisar também o comportamento das fachadas e como elas reagem às condições climáticas. Segundo Alves (2014), as fachadas de concreto devem ser projetadas e executadas pensando na sua durabilidade e vida útil, conforme o local do planeta em que forem executadas, sem deixar de se preocupar com as demais funções que as fachadas devam cumprir, por exemplo, a estanqueidade à água. O Brasil é um país tropical que possui médias de temperatura mais altas em relação a alguns países da Europa, por exemplo, e dentro do próprio território nacional, essas temperaturas também variam drasticamente de região para região, sendo maiores nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste, e menores nos estados das regiões Sudeste e Sul. Nestas circunstâncias, as diferenças existentes entre as temperaturas máximas e mínimas medidas ao longo do

dia tendem a gerar elevados gradientes térmicos. No caso de fachadas que recebem a incidência dos raios solares durante a maior parte do dia, existe maior tendência ao choque térmico, devido a grande diferença de temperatura da parte externa com a parte interna do edifício, o que se acentua se houver refrigeração de ar no interior do edifício, muito comum em cidades quentes como é o caso de Goiânia, sobretudo nos edifícios localizados em regiões com elevada concentração de edifícios, nas quais o fenômeno das ilhas de calor costumam acontecer.

### 2.2.1 *Comportamento termo-dinâmico das fachadas de concreto armado*

A norma brasileira que regularizou um ensaio padrão para este aspecto foi a chamada Norma de Desempenho, NBR 15.575 (ABNT, 2013), que em sua parte 4 definiu o procedimento de ensaio para avaliação dos efeitos do choque térmico, o qual consiste em submeter a essa situação, uma parede devidamente acabada (nas condições da entrega ao usuário final), com aproximadamente 1,20m de largura, com a altura do pé direito da edificação estudada e com a espessura característica. O ensaio tem como aparelhagem: um painel radiante que fornece calor fazendo com que a face externa da parede atinja uma temperatura de  $(80 + 3) ^\circ\text{C}$ , um dispositivo para aspersão de água sobre a parte externa do corpo-de-prova, termopares e registradores de temperatura superficiais da parede externa, defletômetro de haste com resolução de 0,02 mm e um dispositivo que permita a fixação do corpo de prova nas suas extremidades verticais superior e inferior. O painel é aquecido por aproximadamente 1 hora até alcançar a temperatura da face externa de aproximadamente  $80^\circ\text{C}$ . Em seguida é feito o resfriamento por meio de jatos de água, até que a temperatura se aproxime dos  $20^\circ\text{C}$ . Este procedimento é repetido 10 vezes, e durante o experimento e ao seu término são analisados os reflexos das mudanças bruscas de temperatura.

Com base neste ensaio previsto na norma brasileira e também em normas estrangeiras, Alves et al (2014) estudaram e realizaram ensaios de acordo com a NBR 15.575-4 (ABNT, 2013) embora aumentando a largura do corpo de prova de 1,2 m para 2,4 m e fixando suas laterais. Ao analisar os resultados esses autores observaram que os corpos de prova com largura de 2,40 m e fixados nas duas direções obtiveram resultados mais representativos da realidade, pois ao fazer essas duas alterações aumenta-se o valor das tensões na placa e as movimentações higrotérmicas, reproduzindo mais fielmente as restrições impostas pelo próprio sistema de vedação interna e externa. Outro aspecto citado por Alves et al (2014) é a mudança de cor do corpo de prova do ensaio. Quanto a esse fator, os autores comentam que nenhuma das normas trata do assunto, e explicam

que existe diferença entre painéis de cores claras e painéis de cores escuras. A situação mais crítica ocorre para os painéis de cores médias e escuras, pois atingem a temperatura de ensaio de forma mais rápida do que as cores claras, o que resulta em um maior gradiente de tensões e um maior gradiente de temperatura tendo em vista o núcleo do elemento de vedação. Isto ocorre em função das cores claras apresentarem tendência de refletirem o calor emitido por radiação, enquanto as cores escuras apresentam tendência de absorver esse calor.

Como explica Melo Júnior (2010) pelo fato de as fachadas estarem expostas às características climatológicas da região na qual se encontram, seu comportamento será afetado por vários elementos desse clima, como o vento, a chuva, a radiação solar, a umidade e a variação de temperatura, os quais contribuem com a degradação direta das características dessa fachada e sua durabilidade.

Já como cita Consoli (2006) um dos agentes que mais causam problemas para as fachadas é a temperatura, pois ela provoca variações físicas e químicas nos materiais constituintes, o que acaba por gerar algumas manifestações patológicas, como por exemplo, fissuras, descolamento de revestimentos, pequenas rupturas localizadas e principalmente grandes tensões em suas interfaces.

Antunes (2010), por sua vez, alerta da necessidade de se conhecerem os materiais que constituirão a fachada para sua execução, pois um desses problemas na estrutura que a temperatura provoca são variações dimensionais chamadas de dilatação e contração, que podem gerar tensões excessivas levando ao surgimento de fissuras e deformações na fachada.

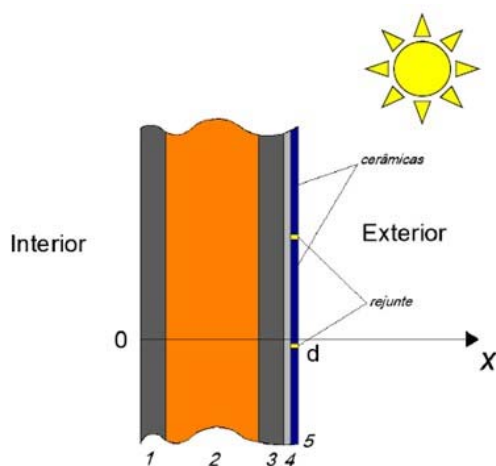
De acordo com Timoshenko et al (1951) distribuições não uniformes da temperatura em um corpo podem induzir tensões no material, ou seja, temperaturas diferentes aplicadas em pontos diferentes da fachada devem gerar expansão ou retração em pontos não previstos, podendo levar ao surgimento de tensões. Tensões também podem ser geradas em caso de haver restrições às deformações ocasionadas pelas temperaturas às quais as fachadas estiverem expostas, sobretudo porque as fachadas são compostas de materiais com comportamentos térmicos distintos e que serão, ao seu próprio modo, restrições às deformações de elementos/materiais adjacentes.

Barbosa (2013) complementa que o aparecimento dessas tensões pode ser causa de aparecimento de quadros severos de trincas no material.

Barbosa (2013) realizou um estudo das tensões térmicas de uma parede de fachada sob incidência de carregamento térmico, recebendo energia térmica solar por radiação variável durante o dia. O modelo de parede

estudado era composto de cinco camadas: a primeira camada era composta do chapisco, do emboço e da pintura interna; a segunda camada consistia de alvenaria ou de concreto; a terceira camada era composta de chapisco e emboço que são aplicados sobre o substrato (revestimento externo); a quarta camada era constituída pela argamassa colante, cuja função era unir o revestimento cerâmico ao emboço; e a quinta e última camada compreendia o rejunte e o revestimento cerâmico. Porém, para realizar o estudo em questão, foi levado em consideração apenas as três últimas camadas. O autor conseguiu realizar o cálculo da dilatação equivalente entre as três camadas e determinou a localização das tensões definindo e resolvendo um sistema de equações diferenciais.

**Figura 1 – Modelo mostrando corte de parede de fachada, exibindo as 5 camadas. Barbosa (2013)**



Fonte: Barbosa (2013)

Ainda de acordo com Barbosa (2013), tensões que ocorrem nas fachadas podem fazer com que ocorram falhas nos materiais constituintes da estrutura, como por exemplo trincas, pelo fato de que o surgimento constante dessas tensões pode desencadear fadiga nos materiais.

A magnitude da tensão que irá ocorrer é decorrente do gradiente de temperatura, ou seja, quanto maior a diferença de temperatura no material, maior será a intensidade da tensão que o mesmo irá sofrer, como explica Cervo (2004 apud Balbo, 2001).

Por sua vez, Chagas (2009) afirma que essa fadiga térmica ocorre devido aos constantes ciclos de aquecimento e resfriamento que o material é submetido diariamente, gerando alternâncias das tensões. Isso faz com que fraturas sejam causadas, porém pelas tensões térmicas e não pelas tensões mecânicas.

Chagas (2009) estudou a fadiga em uma fachada exposta ao sol e, em seguida, à chuva. No estudo realizado, a exposição ao sol representa, numa analogia

com os ensaios mecânicos de fadiga, as etapas de carregamento, nas quais as dilatações induzem tensões térmicas positivas, enquanto à exposição à chuva representa as etapas de descarregamento, nas quais o material ou a estrutura constituída por ele, sofre contrações, induzindo tensões térmicas negativas. Neste caso, pela magnitude das tensões impostas e pelo número de ciclo, ocorreu o que se chama de fadiga de alto ciclo, que consiste na imposição de baixas tensões a uma estrutura ou material por um número tão grande de ciclos capaz de reduzir progressivamente a resistência ao esforço aplicado, de modo a torná-lo inferior à tensão aplicada, causando então a ruína.

Já como explica Silva et al (2014) com a existência de variação térmica entre os componentes da fachada que são ligados entre si, ocorrem tensões e deformações de forma diferente justamente pelo fato de os materiais apresentarem propriedades térmicas e mecânicas distintas, problema que pode causar a diminuição de resistência e de aderência entre os componentes da fachada e que, se somados com outras manifestações patológicas pré-existent, como as fissuras, acaba agravando os problemas associados especificamente às tensões e deformações de origem térmica.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Levantamento bibliográfico

Inicialmente foi realizado levantamento bibliográfico, com as contribuições recentes da literatura técnica para embasar a pesquisa. A busca dos trabalhos foi realizada no portal de periódicos Capes através da plataforma CAFe, sendo utilizadas nas buscas os seguintes descritores: fachada de concreto (“*concrete façades*”), análise térmica (“*termal analysis*”), análise estrutural (“*structural analysis*”), comportamento termo-estrutural (“*termal-structural behavior*” e/ou “*thermal-structural behavior*”), método dos elementos finitos (“*finite element method*”). Os trabalhos foram selecionados considerando os seguintes critérios: ano de publicação (com prioridade àqueles publicados nos últimos 10 anos) e fator de impacto (ou índice equivalente). Também foram utilizados livros, anais de congressos, entrevistas com profissionais, e outras fontes de informação convenientes que os autores julgaram relevantes.

Da revisão bibliográfica foram levantados dados para subsidiar as análises numéricas.

#### 3.2 Geometria e malha

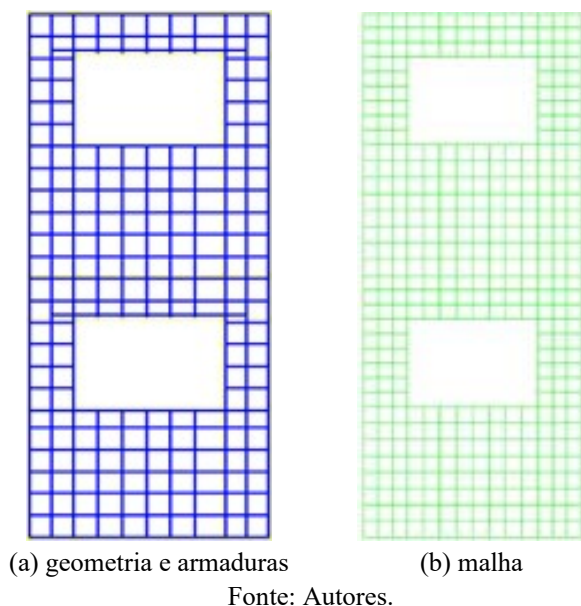
Nesta etapa definiu-se um painel de concreto armado de espessura 12 cm, altura 6 metros, 4 metros de largura, simulando uma fachada de 2 pavimentos, na qual existe



uma abertura de 1 metro de altura e 2 metros de largura (janela de alumínio) em cada pavimento. Como pode-se ver na Figura 2a.

A geometria foi discretizada em elementos finitos respeitando as limitações de número de elementos da versão educacional, restrita a 1000 elementos para a geração da malha, obtendo-se 455 nós e 380 elementos (ver Figura 2b). À essa malha serão aplicadas as condições de contorno e carregamentos, bem como associados os materiais.

**Figura 2 - Geometria e malha definida no Diana.**



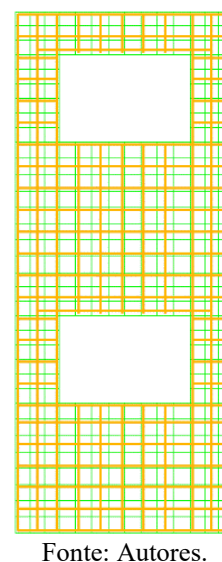
Em função do uso de dois módulos de processamento acoplados, “*Heatflow-Staggered stresses 2D*” e “*Nonlinear Structural Analysis*”, foi necessário empregar dois elementos finitos diferentes, cada um para uma análise específica. Na primeira análise, a térmica, foram utilizados os elementos finitos de membrana Q4HT, com 4 nós, cada um com dois graus de liberdade representativos das translações nas direções x e y. Uma vez obtidos os dados da análise térmica, estes são introduzidos automaticamente no arquivo de dados para posterior análise estrutural pelo módulo “*Nonlinear Structural Analysis*”, quando o elemento Q4HT é substituído automaticamente na malha pelo elemento Q8MEM, elemento equivalente que apresenta as mesmas características, exceto o fato de não ser adequado à análises térmicas.

### 3.3 Armaduras

As fachadas foram armadas com barras de 8 mm a cada 25 cm nas direções horizontal e vertical ao longo de todo o painel. Na borda superior às aberturas das janelas, em função de como foram criadas as armaduras, foram colocadas armaduras de combate à fissuração.

As armaduras foram representadas no modelo com o auxílio do “*reinforce*”, um recurso do programa Diana que modifica a rigidez dos elementos que atravessa de forma a simular virtualmente a presença de uma armadura naquela região do modelo. As armaduras dos modelos são apresentadas na Figura 4.

**Figura 4 – Representação do painel de concreto com a armadura.**



### 3.4 Modelos constitutivos

Para as análises térmicas, é necessário configurar o modelo constitutivo adequado para o fluxo de calor. Seguindo-se a configuração dos modelos constitutivos da análise estrutural.

Para o concreto em análise térmica foram definidas as seguintes propriedades: condutividade térmica de 0,0029 W/m°C e capacitância de 2650. Já para a análise estrutural, o concreto foi considerado um material isotrópico em regime elástico linear, sendo especificadas as seguintes propriedades: módulo de elasticidade de 28 GPa; coeficiente de Poisson de 0,2; resistência à tração igual a 1,8 MPa; resistência à compressão de 25 MPa e coeficiente de dilatação térmica de  $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

O aço das armaduras, por sua vez, na análise térmica, teve informada a condutividade térmica de 0,19 W/m°C. Para a análise estrutural, o material foi considerado como isotrópico em regime elástico linear e metal com comportamento elastoplástico perfeito, sendo informadas as seguintes propriedades: módulo de elasticidade de 210 GPa; coeficiente de Poisson igual a 0,3; resistência à tração de 500 MPa e coeficiente de dilatação térmica de  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

### 3.5 Condições de contorno

As condições de contorno especificadas para as fachadas são apoios de primeiro (lado direito) e segundo gênero (lado esquerdo) na base ao longo de uma faixa de 1 m.

### 3.6 Solicitações

A fachada foi analisada sob efeito de uma temperatura de 32°C para simular seu comportamento durante a manhã, sendo consideradas duas situações: com presença e sem presença de sombra. Isso se fez tendo em vista a possibilidade de as sombras de edifícios vizinhos interferirem na temperatura da fachada em questão. A temperatura inicial (ambiente) foi fixada em 22 °C.

Além das solicitações de origem térmica, foram aplicadas forças uniformemente distribuídas nos painéis visando simular as condições de apoio de estruturas de telhado e laje de concreto na própria fachada. Na parte inferior, a força foi de 15 kN/m, enquanto na parte superior, a força foi de 17,5 kN/m.

### 3.7 Configuração da análise

Os sistemas de equações da análise térmica e da análise estrutural foram resolvidos pelo método Newton-Raphson convencional (com atualização da matriz de rigidez) para solucionar o sistema não linear de equações, com 100 passos de carregamento e 500 buscas para agilizar a convergência. Para contornar problemas relacionados à não linearidade geométrica (flambagem da fachada) utilizou-se o método do comprimento de arco com 500 iterações.

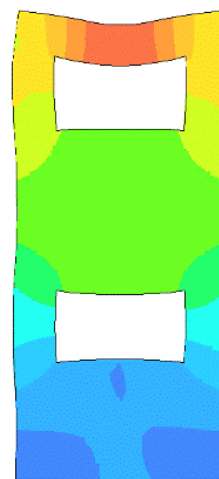
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a conclusão das etapas de criação e concepção do modelo computacional o programa Diana processou os dados inseridos e forneceu os seguintes resultados das análises realizadas.

### 4.1 Resultados da análise estrutural

De acordo com os resultados obtidos constatou-se que a variação de temperatura, tanto na consideração da fachada com sombra quanto sem sombra não teve influência na análise estrutural, pois nos dois casos as deformações foram as mesmas o que possibilitou-se deduzir que essas deformações aparentes foram obtidas apenas pela influência das solicitações de 15 kN no topo da fachada e de 17,5 kN no centro da mesma, como mostra a figura 5.

Figura 5 – Deslocamento máximo sob ação das cargas.



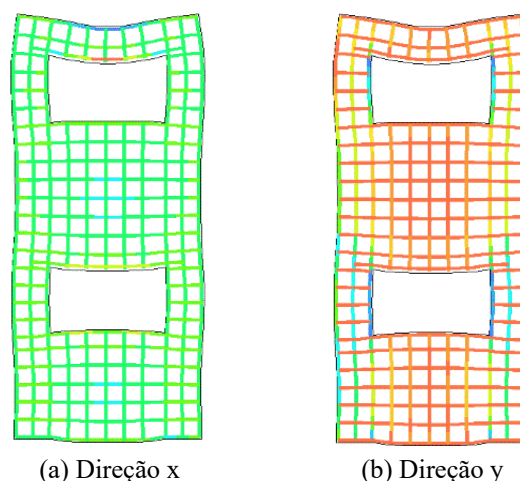
Fonte: Autores.

O deslocamento máximo devido aos carregamentos foi de 0,789 mm e está posicionado acima da abertura superior, na região central, representado na figura pela cor vermelha. Nota-se que conforme a carga vai chegando perto da base as deformações vão ficando cada vez menores.

Outra análise realizada diz respeito às tensões normais nas direções x e y tanto no concreto quanto na armadura. Os resultados estão representados nas figuras 6, 7, 8 e 9.

Nas armaduras horizontais (direção X) pôde-se observar que as maiores tensões tanto de tração (cor vermelha) quanto de compressão (cor azul), se concentram na parte superior da fachada e nas extremidades das esquadrias. Esses valores máximos obtidos são: 2,03 MPa na tração e 4,56 MPa na compressão. Em todo restante do modelo as tensões estão bem uniformes e mais baixas apresentando uma tensão de compressão em torno de 0,96 MPa.

Figura 6 – Representação das tensões normais nas armaduras.



(a) Direção x

(b) Direção y

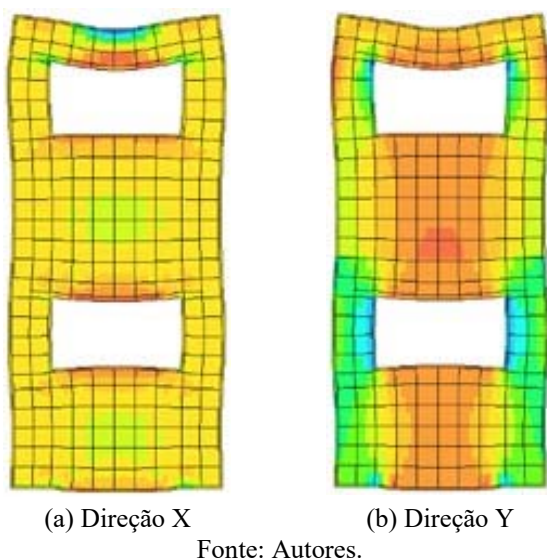
Fonte: Autores.



Nas armaduras verticais (direção Y) observa-se que há uma concentração de tensões de tração em toda faixa central da estrutura, tendo seu valor mais crítico pontualmente no centro da fachada, com o valor de 0,988 MPa. Porém quando se analisa as laterais tanto da fachada quanto das esquadrias e o ponto onde a estrutura está apoiada pode-se observar que há uma concentração de tensões de compressão, nos quais teve-se um valor máximo de 6,84 MPa, apontado nas laterais da esquadria.

Já analisando o concreto, as tensões normais na direção X obteve-se o valor máximo de tração de 40,6 MPa concentrado na região da parte superior da esquadria do segundo pavimento e representado pela cor vermelha. Entre as duas esquadrias (piso do pavimento superior), no topo da fachada e entre a esquadria inferior e a base da fachada aparecem as maiores tensões de compressão no valor de 28,4 MPa. Esses valores estão representados pela cor azul. Nos demais pontos da fachada as tensões foram uniformes e mais brandas, em torno de 9,0 MPa, que está representado pela cor verde.

**Figura 8 – Mapa de tensões normais na fachada na direção X.**

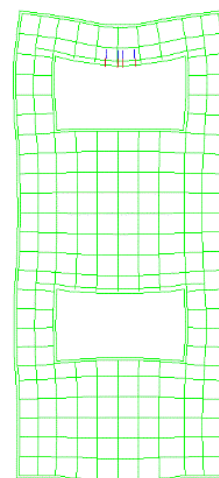


Já na direção Y houve uma distribuição das tensões de tração por quase toda a fachada, os maiores valores ficaram na região central em toda sua altura e o valor máximo obtido foi de 4,07 MPa (tração) representado pela cor vermelha. Toda a área com a cor próxima à vermelha são valores de tensão muito próximos ao valor máximo. Nas laterais, tanto da fachada quanto das esquadrias, apareceram os menores valores de tensão, representados pela cor azul, sendo o valor mínimo igual a -43,4 MPa (sinal negativo para a compressão).

Ainda sob a ação das cargas foram observadas pequenas fissuras no concreto situadas somente na parte superior da esquadria do segundo pavimento, as quais

são mostradas na Figura 10. A soma das aberturas das fissuras foi de 0,18 mm.

**Figura 10 – Fissuras na fachada.**



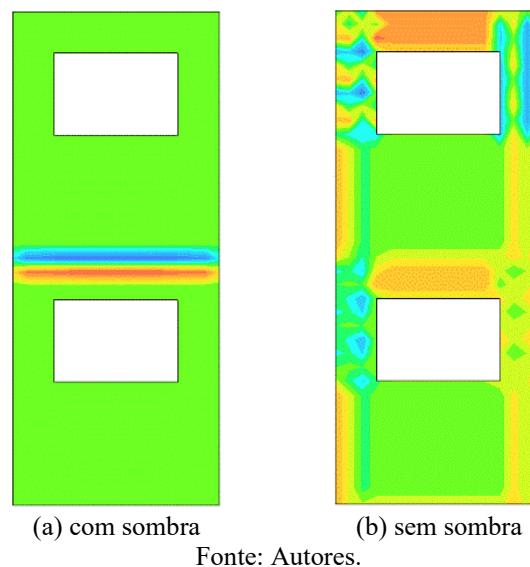
Fonte: Autores.

Após a análise estrutural, foram obtidos os resultados da análise térmica de forma separada. Com isso pôde-se observar uma diferença de comportamento da temperatura entre as fachadas com sombra e sem sombra que possibilitaram realizar comparações.

#### 4.2 Resultados da análise térmica

Sob efeito da temperatura, os fluxos de calor externo nas fachadas foram bem diferentes (ver Figura 11). Nota-se que na situação com sombra os valores de maior intensidade ficaram bem concentrados no centro da estrutura de forma horizontal, e no restante o fluxo foi bem distribuído de maneira homogênea.

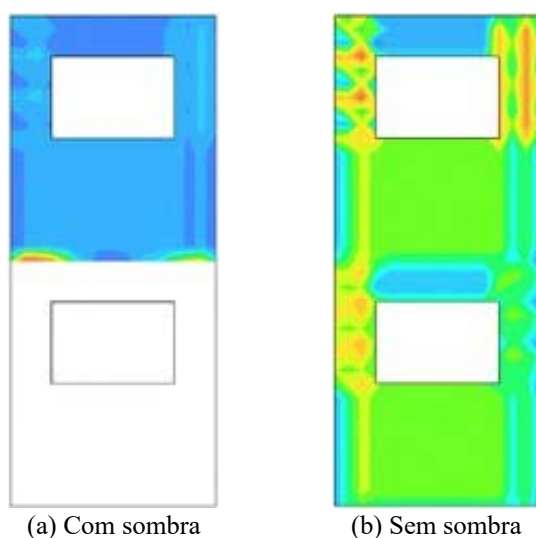
**Figura 11 – Mapa de fluxo térmico externo na fachada com sombra e sem sombra respectivamente.**



Já na situação da fachada sem sombra pode-se perceber a formação de bielas, que é a concentração de calor na parte superior das esquadrias, esse valor é o maior apresentado, representado pela cor vermelha. Observa-se também que na parte lateral de toda a fachada há uma incidência de calor de intensidade significativa e não homogênea devido aos apoios diferentes de cada lado, como mostrado pela cor amarela.

Em relação à resposta térmica ao fluxo externo das fachadas, observa-se no modelo em que foi feita a distinção entre partes com e sem sombra, que o calor se distribuiu na fronteira entre as duas regiões, não atingindo a região com sombra em razão de a consideração realizada assumir que nela o fluxo térmico é nulo. Por sua vez, no modelo totalmente sem sombra, o calor se distribuiu com maior variação nas regiões vizinhas às bordas periféricas ou das aberturas, não tendo apresentado simetria em razão da assimetria nas vinculações.

**Figura 12 – Resposta térmica ao fluxo externo**



Fonte: Autores.

## 5 CONCLUSÕES

Das análises apresentadas, destacam-se as seguintes conclusões:

Os deslocamentos não foram significativos, uma vez que, conforme apresentado nos resultados não excedeu a 1mm. Já a distribuição das tensões não foi afetada pela vinculação, embora tenha sido afetada pela geometria e pela posição das aberturas.

Na análise térmica, observou-se que o fluxo de calor é mais intenso na região de entorno das aberturas devido ao fato de as mesmas influenciarem e restringirem a distribuição. Devido aos fluxos mais intensos se apresentarem nas laterais da fachada e das aberturas, há

uma maior chance de que problemas como a fadiga dos materiais da fachada, surjam nessa região pela ação do ciclo de aquecimento e resfriamento ao longo do dia.

No modelo da fachada com sombra, a resposta ao fluxo externo na parte inferior é nula, uma vez que a consideração feita assume que esta região não aceita calor.

A geometria da fachada, a posição de aberturas e as vinculações afetam a distribuição do fluxo de calor na fachada, assim como também afetam a distribuição de tensões.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2014. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. NBR 15200. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: edificações habitacionais: desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16747: Inspeção predial – Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento. Rio de Janeiro, 2020.

ALVES, L. O.; FONTENELLE, J. H.; MITIDEIRI FILHO, C. V. Durabilidade de fachadas: método de ensaio para verificação da resistência à ação de calor e choque térmico. 2014. p 53-67. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14.

ANTUNES, G. R. Estudo de Manifestações Patológicas em Revestimento de Fachada em Brasília – Sistematização da Incidência de Casos. 2010. 167p. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. 2010.

ARAUJO, E.M. Análise do comportamento termodinâmico do concreto submetido a altas temperaturas por meio de simulações numéricas. 2019. 85p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado). Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2019.

BALBO, J. T. Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga. In: Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação. Brasília: ABPv, 2000, v. 1, pp. 391-404.

BARBOSA, A. S. Estudo numérico-computacional e analítico do choque térmico em fachadas de edificações. 2013. 275p. Dissertação (Mestrado) –

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília. 2013.

BAUER, E.; KRAUS, E.; DA SILVA, M. N. B. Patologia e deterioração das fachadas de edifícios em Brasília: estudo da quantificação e tipologia de danos. In: Patorreb 2012: 4º Congresso de patologia y rehabilitación de edificios: 12-14 de abril de 2012, Santiago de Compostela. Colexio Oficial de Arquitectos de Galicia, 2012. p. 55.

CÁNOVAS, M. F. Patologia e terapia do concreto armado. Tradução de M. Celeste Marcondes, Beatriz Cannabrava. Pini, São Paulo, 1988.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO FILHO, J. R. Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de Concreto Armado. 4. ed. Edufscar, São Carlos, 2014.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 5. ed. Brookman, Porto Alegre, 2016.

CERVO, T. C. Estudo da Resistência à Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação. 2004. 220p. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria. São Paulo. 2004.

CHAGAS, S. V. M. das. Estudo e Proposta de um Modelo de Resistência à Fadiga de Argamassas de Revestimento em Estado Plano e Tridimensional de Tensões. 2009. 173p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília. 2009.

CONSOLI, O. J. Análise da Durabilidade dos Componentes das Fachadas de Edifícios, sob a Ótica do Projeto Arquitetônico. 2006. 208p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

COSTA, C. N. Dimensionamento de Elementos de Concreto Armado em Situação de Incêndio. 2008. 2 v. 440p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

FABIANI, V. Edificações com paredes de concreto: Fatores que influenciam no surgimento de defeitos na superfície das placas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. 85p.

FIORITO, A. J. S. I. Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e Procedimentos de Execução. 2. ed. São Paulo, Pini, 2010.

FLORES-COLEN, I. DOS S. Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva. Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico, 2009.

FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. Premature stains in façades of recent buildings. 2nd International Symposium in Lisbon, LNEC, Lisboa, Portugal. 2003.

GASPAR, P.; FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. de. Técnicas de diagnóstico e classificação de fissuração em fachadas rebocadas. 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios–PATORREB, 2006.

JOISEL, Albert. Fisuras y grietas en morteros y hormigones: sus causas y remedios. Reverte, 1975.

LIMA, R. C. A. Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas. 2005. 241p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MELO JÚNIOR, C. M. Influência da chuva dirigida e dos detalhes arquitetônicos na durabilidade de revestimentos de fachada. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2010. 204f.

PETRUCCI, E.G.R. A ação do fogo sobre as estruturas de concreto armado e protendido. In: COLÓQUIO SOBRE DURABILIDADE DO CONCRETO, 1972. São Paulo. Instituto Brasileiro de Concreto, 1972.

PURKISS, J. A. Fire safety engineering design of structures. Butterworth Heinemann. Oxford, 2000.

SILVA, D. S. Propriedades mecânicas residuais após incêndio de concretos usados na construção civil na grande Florianópolis. 2009. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SILVA, J. S. Estudo de concretos de diferentes resistências à compressão submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET). 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. 147p.

SILVA, M. N. B.; BAUER, Elton; DE CASTRO, E. K. Avaliação da degradação em sistemas de revestimento cerâmico de fachadas de Brasília. 2014. 11p. Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento. Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília. 2014.

SILVA, M. N. B. Avaliação Quantitativa da Degradação e Vida útil de Revestimentos de Fachada - Aplicação ao Caso de Brasília. 2014. 198p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília. 2014.

SERRA, S. M. B.; FERREIRA, M. de A.; PIGOZZO, B. N. Evolução dos Pré-fabricados de Concreto. 2005. 10p. Núcleo de Estudos e Tecnologia em Pré-moldados (NET-PRÉ), Departamento de Engenharia Civil,

---

Universidade de Federal de São Carlos. São Carlos. 2005.

SANTOS, R. E. A armação do concreto no Brasil: História da difusão da tecnologia do concreto armado e da construção de sua hegemonia. 2008. 338p. Tese (Doutorado) Curso de Engenharia Civil – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

SANTOS, M. J. B. O. (2017). Catalogação de patologias em fachadas de edifícios residenciais de Brasília. Dissertação (Mestrado), Universidade de Brasília, Brasília, 2017, 212p.

SOLLERO, M. B. S. Propriedades Mecânicas residuais do concreto em situação de incêndio, Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, 2019. 215p.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. (1951) “Theory of Elasticity”, McGraw Hill Book Company Inc.. New York, United States.

VILHENA, A. Anomalias mais frequentes na superfície corrente de paredes devidas à humidade. PATORREB 2003 - 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Porto, FEUP, 2003.