



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DOUGLAS GOES SAMPAIO SOUZA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO DA TEMPERATURA NO
COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

RUSSAS

2021

DOUGLAS GOES SAMPAIO SOUZA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO DA TEMPERATURA NO
COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Campus de Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Esequiel Mesquita.

RUSSAS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S237s Souza, Douglas Goes Sampaio.

Simulação numérica do efeito da temperatura no comportamento de estruturas de concreto armado / Douglas Goes Sampaio Souza. – 2021.

60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Civil, Russas, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita .

1. Análise de estruturas. 2. Estática. 3. Projeto estrutural. 4. Temperatura. I. Título.

CDD 620

DOUGLAS GOES SAMPAIO SOUZA

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO EFEITO DA TEMPERATURA NO
COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil do Campus de Russas da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 31/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita (Orientador)

Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Otávio Rangel de Oliveira Cavalcante

Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Me. Marcos Andrew Soeiro (Avaliador)

Universidade de Fortaleza - UNIFOR

À Deus.

Aos meus pais, Vilândia e Anastácio.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, por guiar e abençoar meu caminho.

Aos meus pais por todo apoio sentimental e financeiro, sendo eles parte importante nesse processo, acreditando e lutando por mim. Tenho muito orgulho de quem são, do suor que derramaram para que esse momento de me tornar engenheiro chegasse. Obrigado!

Ao meu orientador Professor Dr. Esequiel Mesquita, por toda condução necessária para o desenvolvimento deste trabalho, e até mesmo pelos conselhos e incentivos. Assim como também pelo ótimo trabalho na coordenação do curso, elevando nosso patamar frente à universidade.

Aos professores participantes da banca examinadora, Dr. Otávio Rangel e Me. Marcos Andrew, por serem solícitos e contribuírem para a conclusão deste trabalho.

A Universidade Federal do Ceará, por contribuir para minha formação e pelo apoio financeira da assistência estudantil.

Aos caros amigos da segunda turma de engenharia civil do Campus de Russas, em especial: Emanuel Silva, Renato Alves, Loyana Gondim, Matheus Viana, Tálisson, Matheus Martins, Ana Carolina, Adiláyne Mendes, Matheus Jesus, Isabelle Alves, Caio Silva, Daniele Fernandes e Edson Borges.

RESUMO

O que se observa no cenário atual das edificações é sua implantação cada vez mais inserida em ambientes agressivos aos seus sistemas. Esse fato ocorre principalmente com o aumento acelerado da poluição urbana, o que tornou o meio mais hostil. Com isto, conseqüentemente, as edificações e seus sistemas tornam-se mais suscetíveis à aparição de manifestações patológicas. Sendo assim, fatores do ambiente da qual será implantada a edificação são determinantes na vida útil das edificações, pois situações como estas impactam diretamente em seu desempenho e principalmente na segurança estrutural e sua durabilidade. Dentre os fatores ambientais, destaca-se a temperatura como um dos principais agentes, devido sua atuação influente tanto no estado fresco quanto endurecido do concreto. Seu empenho é preocupante em razão da retração causada no concreto e sua adição de esforços normalmente não considerados na análise, resultando na fissuração da estrutura e tornando sua armadura vulnerável à corrosão. Dessa forma, o desenvolvimento de análises estruturais que considerem o clima e suas variações são cada vez mais necessário. Satisfazendo isto, esse trabalho teve como objetivo principal a análise estrutural estática com foco nos parâmetros de deformação, tensões atuantes, tensões equivalentes de Von Mises, considerando a temperatura do ambiente local. O material estudado foi um projeto estrutural concebido de 4 pavimentos, destinado a uso comercial e idealizado para a cidade de Russas-CE. Utilizou-se dos métodos dos elementos finitos, por meio do software ANSYS para simular as análises com e sem a condição da temperatura local. Os resultados foram confrontados e notados que seus valores se tornavam desfavoráveis com a aplicação da temperatura, deixando claro a importância da verificação das condições de contorno ambiental. Além disso, destaca-se que o grau de vulnerabilidade do desempenho estrutural depende da intensidade da condição ambiental e da forma de interação entre as peças estruturais.

Palavras-chave: Análise de estruturas. Estática. Projeto estrutural. Temperatura.

ABSTRACT

What can be observed in the current scenario of buildings is their implementation increasingly inserted in environments that are aggressive to their systems. This fact occurs mainly with the accelerated increase in urban pollution, which has made the environment more hostile. With this, consequently, the buildings and their systems become more susceptible to pathological manifestations. Thus, factors of the environment where the building will be implanted are determinant in the useful life of buildings, because situations like these have a direct impact on their performance and especially on structural safety and durability. Among the environmental factors, temperature stands out as one of the main agents, due to its influential action in both the fresh and hardened state of concrete. Its involvement is worrisome due to the shrinkage caused in the concrete and its addition of stresses normally not considered in the analysis, resulting in cracking of the structure and making its reinforcement vulnerable to corrosion. Thus, the development of structural analyses that consider the climate and its variations are increasingly necessary. Satisfying this, this work had as main objective the static structural analysis focusing on the parameters of deformation, acting stresses, Von Mises equivalent stresses, considering the local environment temperature. The material studied was a 4-story structural project designed for commercial use and idealized for the city of Russas-CE. The finite element methods were used, by means of ANSYS software to simulate the analyses with and without the local temperature condition. The results were compared and it was noted that their values became unfavorable with the application of temperature, making clear the importance of verifying the environmental boundary conditions. Furthermore, it is highlighted that the degree of vulnerability of the structural performance depends on the intensity of the environmental condition and the form of interaction between the structural parts.

Keywords: Analysis of structures. Statics. Structural design. Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Níveis de abstração referente a uma análise estrutural.	17
Figura 2 - Exemplificação do comportamento linear da estrutura.	18
Figura 3 - Exemplificação do comportamento não-linear da estrutura.	20
Figura 4 - a) Surgimento de micro-fissuras; b) Micro-fissuras se ligam e formam macro-fissuras.	24
Figura 5: Influência do tipo de agregados sobre o coeficiente de dilatação térmica do concreto.	26
Figura 6 - Coeficiente de restrição segundo o ACI 207.2R.	29
Figura 7 - Fissuração de uma viga por movimentação de origem térmica.	30
Figura 8 - Ilustração de uma fissura em uma laje devido aos movimentos térmicos.	31
Figura 9 - Modelo estrutural tridimensional.	35
Figura 10 - Concepção estrutural do pavimento térreo – Pilares.	36
Figura 11 - Concepção das peças estruturais do pavimento tipo.	37
Figura 12 - Vista de elevação - lateral direita.	37
Figura 13 - Planta arquitetônica do pavimento térreo.	38
Figura 14 - Planta arquitetônica do pavimento tipo.	38
Figura 15 - Modelo tridimensional exportado para plataforma ANSYS.	43
Figura 16 - Modelo tridimensional exportado para plataforma ANSYS.	44
Figura 17 - Estrutura em seu modelo discretizado.	45
Figura 18 - Ação da gravidade aplicada a estrutura.	46
Figura 19 – (a) Forças distribuídas na laje do 1º pavimento, (b) 2º pavimento e (c) 3º pavimento.	46
Figura 20 - Cargas devido as alvenarias.	47
Figura 21 - Temperatura aplicada incidindo nas faces lateral direita e posterior.	48
Figura 22 - Resultado da deformação sem a temperatura aplicada.	50
Figura 23 - Resultado da deformação com a temperatura aplicada.	51
Figura 24 - Resultado da tensão principal máxima - sem temperatura aplicada.	52
Figura 25 - Resultado da tensão principal máxima - com temperatura aplicada.	53
Figura 26 - Resultado da tensão principal mínima - sem temperatura aplicada.	53
Figura 27 - Resultado da tensão principal mínima - com temperatura aplicada.	54
Figura 28 - Resultado da tensão de Von Mises - sem temperatura aplicada.	55
Figura 29 - Resultado da tensão de Von Mises - com temperatura aplicada.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Influência do teor de agregado sobre o coeficiente de dilatação térmica. .	26
Tabela 2: Valores de condutividade térmica para concreto com diferentes tipos de agregados.	27
Tabela 3 - Característica e propriedade do concreto.....	39
Tabela 4 - Característica e propriedade do aço.....	40
Tabela 5 - Classe de agressividade ambiental (CAA).	41
Tabela 6 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e revestimento nominal para $\Delta c=10$ mm.	41
Tabela 7 - Deformações máximas sem a inclusão da temperatura.	49
Tabela 8 - Resultado dos parâmetros considerados na análise estática.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concret Institute
ASO	International Organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos
CAD	Desenho assistido por computador
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NFL	Não linearidade física
NFG	Não linearidade geométrica
UFC	Universidade Federal do Ceará
f_{ck}	Resistência característica a compressão do concreto
E_{cs}	Módulo de elasticidade secante do concreto
E_{ci}	Módulo de elasticidade tangencial inicial do concreto
f_{ctm}	Resistência característica a tração média do concreto
$f_{ctk,inf}$	Resistência característica a tração inferior do concreto
$f_{ctk,sup}$	Resistência característica a tração superior do concreto
f_{ctd}	Resistência característica a tração de cálculo do concreto
f_{yk}	Tensão de escoamento característica do aço
E_s	Módulo de elasticidade longitudinal do aço

LISTA DE SÍMBOLOS

m	Massa
k	Constante de rigidez
u	Deslocamento
F	Força
α	Coefficiente de dilatação térmica
γ	Peso específico do concreto armado
γ_c	Coefficiente de minoração do concreto

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.2	Objetivos da pesquisa	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	Análise estrutural	17
2.1.1	Análise linear	18
2.1.2	Análise não-linear	19
2.1.3	Análise estática	20
2.1.4	Análise dinâmica	20
2.2	Método dos elementos finitos	21
2.3	Propriedades físicas, mecânicas e comportamento mecânico do concreto	22
2.4	Fissuras por movimentação térmica devido a variação de temperatura em peças de concreto.....	24
2.4.1	Propriedades térmicas do concreto	25
2.4.2	Fatores que afetam as tensões térmicas.....	28
2.4.3	Configurações típicas das fissuras por movimentação térmica	30
2.5	Teoria das falhas	31
2.5.1	Tensões principais	31
2.5.2	Critérios de Von Mises.....	32
3.	METODOLOGIA	34
3.1	Projeto estrutural	34
3.2	Descrição da estrutura	39
3.2.1	Lajes.....	39
3.2.2	Vigas	39
3.2.3	Pilares	39
3.3	Características dos materiais	39
3.3.1	Concreto.....	39
3.3.2	Aço	40
3.4	Qualidade e durabilidade.....	40
3.4.1	Agressividade ambiental.....	40
3.4.2	Cobrimento do concreto	41

3.5	Cargas consideradas.....	42
3.6	Simulação numérica	42
3.6.1	Elemento solid65.....	43
3.6.2	Definição da malha dos elementos finitos e discretização	44
3.6.3	Aplicação de cargas e condições de contorno	45
4.	RESULTADOS	49
4.1	Análise estática	49
4.1.1	Deformação.....	49
4.1.2	Tensões principais.....	51
4.1.3	Tensão de Von Mises	54
5.	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

A vida útil de uma edificação, segunda a NBR: 6118/2014, é entendida como o período da qual a estrutura de concreto preserva suas características sem que tenha passado por intervenções significativas. A redução da vida útil pode ser entendida através do surgimento de danos, localizados ou generalizados, como por exemplo as fissuras provocadas por tensões demasiadas de compressão e tração, deformações indesejadas e vibrações inconvenientes.

Os tipos e a intensidade dos danos, quando não influencia no estado de limite de serviço, são classificados como aceitáveis para os requisitos de desempenho. Tais requisitos podem ser representados a partir das deformações estruturais e oscilações excessivas até os danos localizados. Dessa forma, para que se tenha eficiência no desempenho estrutural é necessário a análise das condições relevantes para a estrutura, como a influência tectônica e geotécnica, resposta da presença de água no solo e as condições climáticas, bem como suas combinações.

A segurança estrutural das edificações pode ser descrita pela probabilidade de que as tensões resistentes da estrutura sejam maiores do que as carregamentos solicitantes. Sendo a resistência destinada a suportar, além das ações, esforços externos que atuam no sistema estrutural, mantendo sua integridade. A ineficiência da segurança estrutural ocorre quando seus estados de limites últimos são atingidos, traduzindo uma ruptura na estrutura.

Essa segurança estrutural possui requisitos de eficiência que implicam na baixa estatística de colapsos estruturais capazes de causar danos à propriedade e riscos a vidas humanas. Para que a segurança seja satisfeita, é necessário a considerações dos possíveis riscos, dos quais possuem grandes chances de ocorrerem devido a ações não inclusas nas análises estruturais, resistência inadequada dos materiais, parâmetros geométricos erroneamente especificados e efeito das condições ambientais.

Se tratando de desempenho e segurança das edificações, vem à tona questões sobre sua durabilidade. Sendo esta última a capacidade da edificação, com

seus sistemas, de satisfazer requisitos mínimos planejados em projeto, dentro de um período determinado e sob exposição das ações ambientais (ISO 13823/2008). Os fatores que diminuem esses requisitos estão diretamente ligados aos materiais e condições de uso, manutenção, projeto e condições de exposição.

Andrade e Silva (2005) destaca a importância de que na etapa de concepção estrutural, sejam considerados, além de todas as cargas que a estrutura estará submetida, os requisitos do ambiente de implantação da estrutura, para que essa seja satisfeita na questão de durabilidade.

Lima (2005) também afirma que a consideração ambiental seja tão importante quanto as propriedades mecânicas, pois as ações do meio ambiente também influenciam na vida útil do concreto. A localização da construção e os agentes que atingem a estrutura são determinantes nas causas e intensidade de sua deterioração. Dessa forma, tanto o conhecimento sobre o clima como suas variações são necessários para a escolha da melhor opção de projeto estrutural.

São diversos os fatores que corroboram para a degradação estrutural, dentre eles, podem ser citados a temperatura, a umidade relativa, a poluição do ar, o vento, os sais e a água.

A temperatura pode afetar tanto o concreto no estado fresco quanto o concreto no estado endurecido. Nesses casos ocorrem o desenvolvimento de retração do concreto e aparições de tensões que desencadeiam falhas, essencialmente fissuração, que pode promover a penetração de oxigênio e umidade, resultando na corrosão das armaduras. Conforme mostrado por Mesquita (2019), a temperatura influencia dramaticamente na abertura e fechamento de fissuras, não podendo, portanto, seu efeito ser desconsiderado numa análise que vise identificar a progressão ou estabilização da fissura.

Essas observações refletem a necessidade da análise do comportamento estrutural à luz das condições climáticas, especialmente considerando o efeito da temperatura. A análise estrutural estática descrita ao decorrer desse trabalho, usará como apoio para simulação em modelagem dos elementos finitos o software ANSYS.

Desta forma, pretende-se elaborar uma comparação da análise com e sem a influência da temperatura incidente local, afim de verificar o potencial de interferência dessa condição ambiental.

1.2 Objetivos da pesquisa

1.2.1 Objetivo geral

Simular numericamente a interferência da temperatura no comportamento estrutural de concreto armado.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Realizar a análise estática na estrutural de concreto armado
- b) Compreender impacto da temperatura nas tensões atuantes.

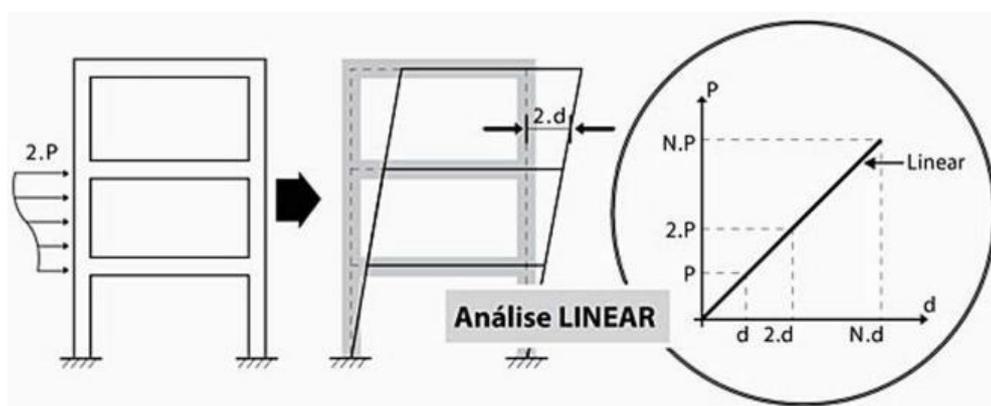
A estrutura real representa o mundo físico, que será em seguida expresso em um modelo estrutural, passando depois a ser transformado em um modelo discreto, e então, para fins de facilidade no desenvolvimento dos cálculos, finaliza como modelo computacional (MARTHA, 2017).

Há uma liberdade na escolha do tipo de análise estrutural, as mais recorrentes e respaldadas pela NBR 6118:2014 são: análise linear, análise linear com redistribuição, análise plástica, análise não linear e análise através de modelos físicos. A mesma norma deixa claro que a utilização da análise estrutural de determinada estrutura pode ser desenvolvida por qualquer tipo das citadas acima, variado apenas na problemática que se queira resolver. Além disso, devem ser estudadas no viés da análise estática e dinâmica.

2.1.1 Análise linear

Na utilização de análise linear, compreende os materiais com um comportamento elástico-linear. Tal comportamento é explicado quando um determinado material sofre deformação, devido a ações externas, e após a incidência dessas ações o material volta a sua forma inicial. Podemos dividir esses comportamentos em perfeitamente elástico, quando o material volta integralmente ao seu estado geométrico inicial; e parcialmente elástico quando boa parcela da geometria retorna ao seu estado inicial (FONTES, 2005). A Figura 2 ilustra o comportamento da estrutura em uma análise linear.

Figura 2 - Exemplificação do comportamento linear da estrutura.



Fonte: Kimura (2007).

Análise linear é baseada no estudo realizado pelo Cientista Robert Hooke, manifestada mundialmente como lei de Hooke. Essa lei nos indica a existência de uma relação linear entre tensão e deformação, conhecida como uma constante denominada Módulo de elasticidade, sendo definida para cada material. A equação a seguir expressa a lei de Hooke (FONTES, 2005).

$$\sigma = E \times \varepsilon$$

Onde:

σ = tensão atuante;

E = módulo de elasticidade longitudinal do material;

ε = deformação específica longitudinal.

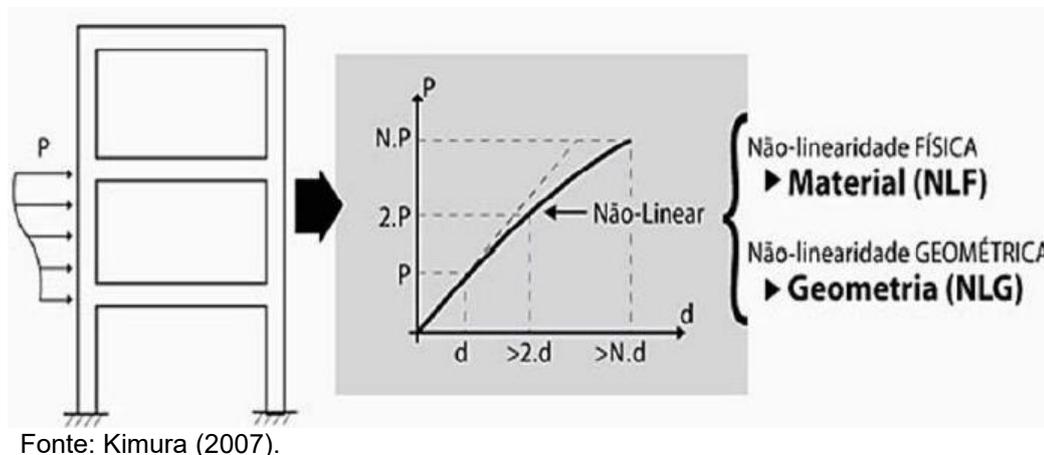
Fontes (2005) ainda aponta que análise linear é mais comumente utilizada na verificação do estado limite de serviço, e em caso de matérias dúcteis, pode-se verificar o estado limite último.

2.1.2 Análise não-linear

Neste tipo de análise, para uma determinada carga, a relação entre tensão e deformação não se comportam de forma linear e proporcional, ou seja, a lei de Hooke não se aplica. Ao contrário da análise linear, não há módulo de elasticidade fixo e definido neste tipo de análise, pois este agora é flexível na interação tensão e deformação (FONTES, 2005).

Segundo o mesmo autor, a não linearidade na estrutura pode ser relacionada com o fato de o concreto armado apresentar modificações em suas propriedades, representando o termo de não linearidade física (NLF). Além da não linearidades físicas, também existem a não linearidade geométrica (NLG), da qual é apresentada como a alteração geométrica quando há uma aplicação de esforços que desencadeiam efeitos de 2º ordem globais, ou seja, a estrutura se desloca e a rigidez final difere da inicial. A Figura 3 representa a análise não-linear.

Figura 3 - Exemplificação do comportamento não-linear da estrutura.



2.1.3 Análise estática

A análise estrutural estática é consagrada como o método de cálculo dos efeitos e condições das ações estáticas atuando na estrutura, da qual não analisa as contribuições de inércia e amortecimento, exemplificadas como os carregamentos variáveis no tempo. E apesar disto, análise estática pode ser utilizada na inclusão de cargas de inércia estática, como a gravidade. (Azevedo, 2015)

Ainda segundo Azevedo (2015), com a análise estática é possível verificar os deslocamentos, deformações, tensões e forças aplicadas à estrutura. Para seu domínio, compreende que os carregamentos e resultantes são adicionados de forma lenta, em referência ao tempo. Dentre os tipos de carregamentos considerados, pode-se destacar as forças e pressões empregadas, forças inerciais estáticas e aquelas que impõem os deslocamentos diferentes de zero.

2.1.4 Análise dinâmica

Análise dinâmica é a verificação do comportamento da estrutura em resposta à carregamentos dinâmicos, ou seja, variáveis no tempo. As respostas esperadas nesse tipo de análise são as mesmas que se obtém com análise estática (tensões e deformação), porém, nesse caso podem ser consideradas como perigosas, uma vez que variam com o tempo e com as cargas que a originam. Diógenes (2010) caracteriza a análise dinâmica como a determinação de deslocamentos, velocidades e aceleração de todos os elementos constituintes de uma estrutura submetida a ações dinâmicas.

De forma global, a análise dinâmica pode ser considerada como um importante indicador no quesito conforto e segurança de uma estrutura, pois através dela é possível identificar danos e modificações por deformação (NÓREGA, 2004).

2.2 Método dos elementos finitos

Quando se tratava de resoluções quanto a vibrações em problemas de engenharia, fazia-se uso de métodos robustos, com poucos graus de liberdade, assim aponta Rao (2008) em seus estudos. O cenário mudou com o desenvolvimento de máquinas com maiores capacidade de processamento, dessa forma os computadores passaram a ser ferramentas de tratamento de sistemas de complexidade moderada e de desenvolvimento de soluções aproximadas em forma semidefinida devido à métodos comuns de solução. No mesmo passo ocorre a evolução do MEF, possibilitando os engenheiros a utilizarem a capacidade dos computadores em análises numéricas de vibrações nos mais variados tipos de sistemas e graus de liberdade.

Para os softwares de análise simularem peças ou conjuntos é necessário, primeiro, que se tenha a modelagem dessas. Para isso, utilizam-se de informações de programas como a plataforma CAD, delimitando suas geometrias e definindo-as seus domínios. As geometrias criadas passam, então, para o processo de discretização: As peças, inicialmente contínuas, são subdivididas em pequenas porções e em quantidade finitas, esses elementos menores são interligados por nós, formando uma malha para análise. Com a definição da discretização fica claro o termo “análise pelo método de elementos finitos”, que difere da análise analítica por fazer uso de infinitas partes. Logo depois da discretização da geometria o software, durante a análise, dará conta de realizar a equação matricial contando com os vetores, matriz de rigidez para analisar os deslocamentos em cada nó e as tensões naqueles pontos (AZEVEDO, 2016).

Se tratando de estruturas na engenharia, o MEF é formalizado para obter resposta do estado de tensão e deformação das peças estruturais frente a ações externas. Nesses casos são utilizados cálculos genéricos da análise de estruturas, que possibilita os estudos com edifícios, barragens, pontes e etc. Em concepção de

estruturas, é comum a análise e modificações nas características geometrias e de materiais com o objetivo de se obter uma melhor eficiência e economia em soluções (ÁLVARO, 2003, p.01).

Os nós da malha, com suas posições e graus de liberdades para movimentação conhecidas, se tornam significativos para os cálculos desenvolvidos pelos programas do MEF. Além disso, a quantidade de cálculos realizados é proporcional ao número de nós. Dessa forma, em estruturas mais complexas haverá uma demanda maior de nós, fazendo com que o computador processe mais cálculos e interações, tal processamento demandará mais tempo para finalizar por completa a análise (ALVARO, 2016).

Segundo Pavlou (2015), o MEF possui, quando comparado com método analítico, algumas vantagens e desvantagens significativas que os engenheiros que utilizam desse método precisam saber. As vantagens se caracterizam principalmente pela possibilidade de trabalhar com geometrias e carregamentos complexos, sendo possível a análise dos mais diversos problemas de engenharia. As desvantagem estão nos seus resultado, a primeira é a precisão, que dependem do número e tipo dos materiais, bem como as premissas usadas; e a segunda é que essa precisão também depende do grau de experiencia do usuário com o software, pois uma vez que haja equivocadas por parte deste, haverá erros na fidelidade dos resultados.

As respostas decorrentes da análise por MEF podem se aproximar dos resultados analíticos. Em ambos os métodos, haverá pequenas diferenças dos resultados reais. Isso ocorre pois os materiais, geometrias e carregamentos podem estar diferentes (AZEVEDO, 2016, p.30).

Ainda segundo Azevedo (2016), na realidade as geometrias podem apresentar imperfeições que modificam a distribuição de esforços e que não podem ser expressas nos programas de MEF, como o processo de fabricação e desforma das peças. O mesmo pode ocorrer com a posição e direção das cargas, apresentando aplicação diferente dos aplicados na análise.

2.3 Propriedades físicas, mecânicas e comportamento mecânico do concreto

Para que se tenha um melhor entendimento sobre os efeitos térmicos atuantes no concreto, é interessante que se tenha um conhecimento sobre suas propriedades físicas e mecânicas. Para o conhecimento dos estados tensionais da matéria é necessário, inicialmente, realizar os estudos dos processos de compressão, tração e deformação do concreto, com o objetivo de entender a influência da temperatura nesses estágios de tensão, partindo do ponto que as variações de temperatura podem contribuir como catalizador nesse processos físicos e mecânicos e ajudar no surgimento de patologias. Assim, serão comentadas, de forma rápida, todos esses processos.

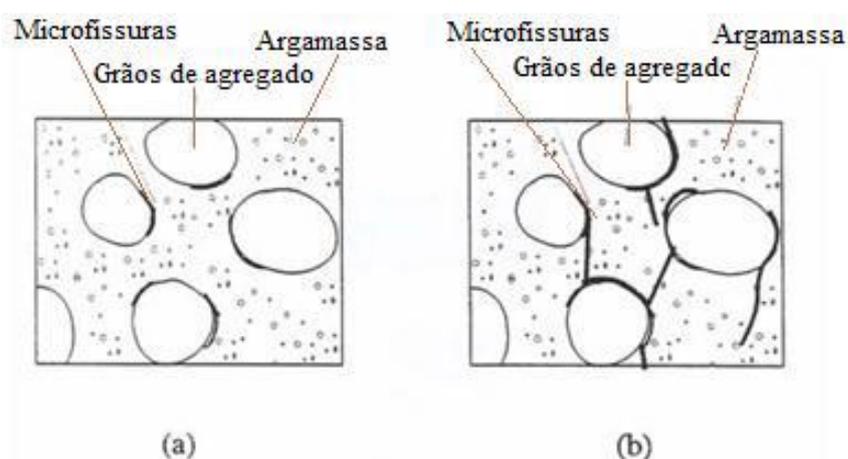
- **Resistência à compressão:** De acordo com Mehta e Monteiro (2008), há vários fatores que podem influenciar a resistência do concreto à compressão devido sua porosidade, são eles a relação água/cimento, teor de ar incorporado, tipo de cimento utilizado, as propriedades dos agregados, os de aditivos adicionados, condições de cura e também o desenvolvimento da idade de hidratação do concreto. Para que haja fissuras nesse processo, é necessário um maior gasto de energia, comparado aos outro.
- **Resistência à Tração:** As fissuras encontradas em estruturas de concreto são comumente intencionadas por esforços de tração, devido a dilatação térmica das peças influenciadas por um aumento de temperatura. De forma contrária, com a diminuição de temperatura, ocorre a retração das peças. Para combater os esforços de tração em uma estrutura, é comum a utilização de concreto armado, uma vez que as armaduras são eficientes na absorção de cargas de tração (Mehta e Monteiro, 2008). Sendo assim, podemos ressaltar, que em uma estrutura de concreto armado, o concreto em si é mais eficiente no emprego de resposta à compressão e aço utilizado nele eficiente à resposta de tração.
- **Módulo de elasticidade:** Segundo Mehta e Monteiro (2008), a medida de rigidez de um determinado material é definida como suas características elásticas. Embora o concreto não apresente comportamento linear, o módulo de elasticidade deve ser estimado, pois, além de compreender as

tensões causadas pela deformação relacionada a interação ambiental, também é possível conhecer a tensão de projeto sob carga.

- **Deformação do concreto:** Como abordado no ponto anterior, deformações, sendo de quaisquer gêneses, podem ocasionar fissurações, levando à estrutura um grau importante de atenção. Elas são desenvolvidas devido ao comportamento do material frente aos esforços externos ou como consequência às ações ambientais.

O surgimento de microfissuras acontece por meio da interação de forças internas e rigidez dentro do concreto. Essas surgem ao redor dos grãos de agregados, motivado pela diferença de resistência entre a matriz do concreto e os próprios grãos. Com a intensificação das tensões, as microfissuras se ligam e evoluem para fissuras macroscópicas que levam o surgimento de trincas (Skumautz, 2006). A figura expressa esse processo.

Figura 4 - a) Surgimento de micro-fissuras; b) Micro-fissuras se ligam e formam macro-fissuras.



Fonte: Kimura (2007).

2.4 Fissuras por movimentação térmica devido a variação de temperatura em peças de concreto

Os materiais de sistemas e subsistemas de uma edificação estão diariamente expostos as mais diversas mudanças de temperatura sazonais. Os movimentos de dilatação e retração desses materiais são consequência direta dessas variações de

temperatura que estão sujeitos. Quando a dinâmica de alteração da geometria desses materiais ocorre, somada as múltiplas restrições pelos vínculos que os envolve, é tendencioso a aparição de esforço que causam o surgimento de fissuras. (THOMAZ, 1989).

Os movimentos relacionados às mudanças de temperatura que ocorrem nos materiais estão relacionados aos seus coeficientes de dilatação térmica e gradiente de temperatura, que são definidos pelos picos de temperatura mínimo e máximo. A quantidade de esforços gerados é determinada pela magnitude da variação dimensional, ao grau de restrição imposto nas ligações a esta variação e propriedades elásticas do material (MEHTA; MONTEIRO, 1994; THOMAZ, 1989).

2.4.1 Propriedades térmicas do concreto

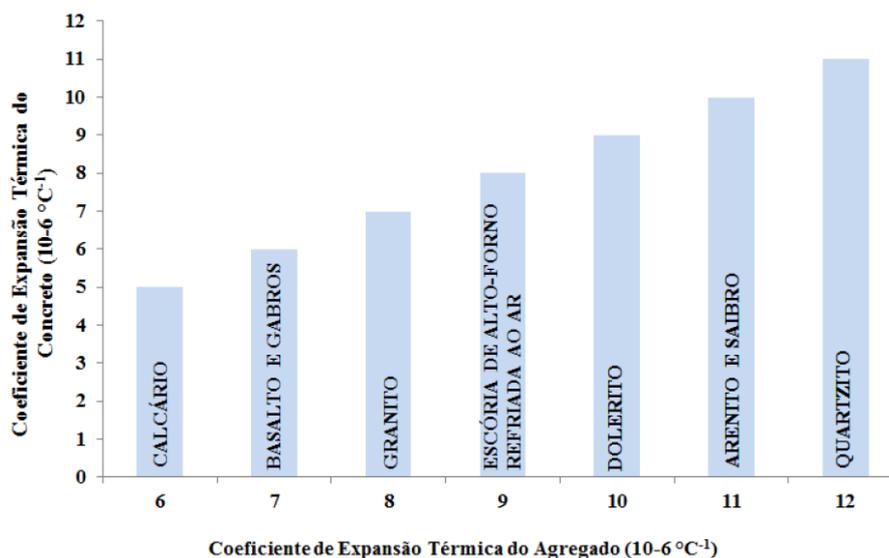
Bem como qualquer material, o concreto também possui propriedades térmicas. Os principais atributos de interesse na pesquisa de movimento térmico são o coeficiente de expansão térmica, o calor específico e a condutividade térmica (COUTINHO, 1988)

De acordo com a NBR 12815 (ABNT, 1993), o coeficiente de dilatação térmica é explicado pela variação na unidade de comprimento por grau de temperatura. Há uma diferença importante no coeficiente de dilatação térmica da pasta de cimento hidratada e dos agregados, sendo este primeiro, em geral, maior que o segundo. As rochas e minerais utilizados na produção de concreto possuem em geral uma dilatação térmica de $5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para calcários e gabros, e $11\text{-}12 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para seixos naturais, arenitos e quartzitos conforme a Figura 5 a seguir (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Segundo a Tabela 1 de Neville (1997), o mesmo coeficiente da pasta de cimento Portland saturada é cerca de $18 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Dessa forma, como o concreto é formado a partir da pasta de cimento hidratada e pelos agregados, o seu coeficiente é a resultante da interação dos dois valores de seus componentes, sendo da ordem de $10 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Como resultado, uma grande mudança na temperatura do concreto produzirá uma diferença significativa nos tamanhos relativos do agregado e da pasta

de cimento, o que pode levar à fissuração do concreto (NEVILLE, 1997; COUTINHO, 1998).

Figura 5: Influência do tipo de agregados sobre o coeficiente de dilatação térmica do concreto.



Fonte: Mehta & Monteiro (1994).

Tabela 1: Influência do teor de agregado sobre o coeficiente de dilatação térmica.

Relação Cimento:areia	Coeficiente de dilatação térmica linear a dois anos de idade, $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Pasta	18,5
1:1	13,5
1:3	11,2
1:6	10,1

Fonte: NIVILLE (1997).

ANBR 12817 (ABNT, 1993), define o calor específico com sendo a quantidade necessária de calor para aumentar a temperatura de uma unidade de massa de determinado material em 1° . O calor específico dificilmente é afetado pelas propriedades mineralógicas dos materiais inertes que compõem o concreto, ou mesmo não tem efeito, mas quando o teor de umidade do concreto é relativamente

alto, o calor específico aumenta significativamente. NEVILEE (1997) ainda acrescenta que o calor específico tenha tendência de aumentar com crescimento da temperatura e com a diminuição da massa específica. A quantidade de calor específico do concreto convencional possui uma variação de 840 a 1170 J/ Kg °C ou entre 0,20 cal/(g°C) a 0,30 cal/(g°C) (FURNAS, 1997).

De acordo com a NBR 12820 (ABNT, 1993), a condutividade térmica fornece o fluxo de calor transmitido por uma área uniforme de um material sob um gradiente de temperatura uniforme. Características mineralógicas do componente agregado são fatores de alteração da condutividade térmica do concreto, sendo eles a umidade, massa específica e temperatura do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Além disso, a condutividade térmica dos agregados pode ser alterada minuciosamente devido à natureza da rocha e da sua intensidade de umidade (COUTINHO, 1988). Os valores demonstrados na Tabela 2 a seguir, são referentes a condutividade térmica para concreto produzido com os mais diversos tipos de agregados.

Tabela 2: Valores de condutividade térmica para concreto com diferentes tipos de agregados.

Tipo de agregado	Condutividade térmica (W/m.K)
Quartzito	3,5
Dolomita	3,2
Calcário	2,6 - 3,3
Granito	2,2 - 2,7
Riolito	2,2
Basalto	1,9 - 2,2

Fonte: Mehta & Monteiro (1994).

Uma outra propriedade relevante que convém destacar é a difusividade térmica, expressa da seguinte forma:

$$k = \frac{K}{c \rho}$$

Onde:

k = difusividade, m^2/h ;

K = condutividade, $J/m.h.K$;

c = calor específico, $J/Kg.K$;

ρ = massa específica do concreto, Kg/m^3 .

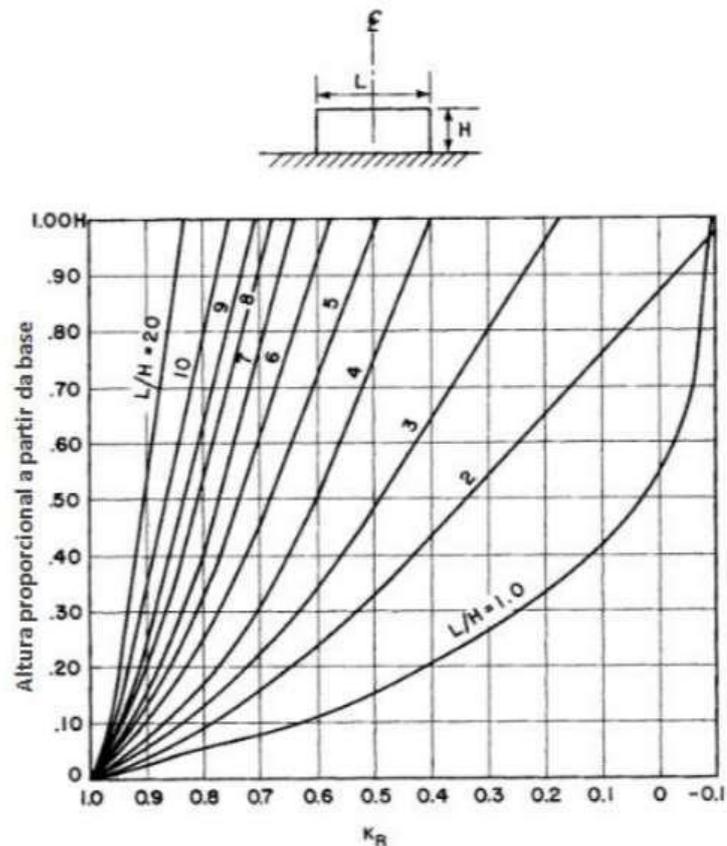
Quanto maior a difusividade térmica, mais facilmente o calor passa pelo concreto. A condutividade normalmente controla a difusividade térmica porque a massa específica e o calor específico não diferem muito.

2.4.2 Fatores que afetam as tensões térmicas

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que quando um elemento de concreto tem liberdade de movimentação, nenhuma tensão devido à variação dimensional térmica ocorre durante o resfriamento. Na prática, o concreto será limitado pela concepção reticulado e hiperestático da estrutura ou por várias alterações em diferentes extensões do próprio concreto.

Dessa forma, é importante a avaliação do grau de restrição a qual a estrutura está submetida para então determinar a intensidade das deformações e tensões térmicas atuante em cada um de seus elementos. O grau de restrição a ser adotado deve ser analisado detalhadamente em cada caso, porém o ACI (American Concret Institute) fornece um critério geral que pode ser útil na definição de tal parâmetro como mostra a Figura 6. Além disso o ACI 207.2R (ACI, 1991) propõe as três equações a seguir para o cálculo do fator de restrição.

Figura 6 - Coeficiente de restrição segundo o ACI 207.2R.



Fonte: ACI (2007)

- Para $L/H > 2,5$, temos kr , em qualquer local acima da base (H), podendo ser expressa por:

$$kr = \left[\frac{\frac{L}{H} - 2}{\frac{L}{H} + 1} \right]^{h/H}$$

- Para $L/H < 2,5$, temos que kr , em qualquer local acima da base (h), podendo sendo expressa por:

$$kr = \left[\frac{\frac{L}{H} - 1}{\frac{L}{H} + 10} \right]^{h/H}$$

- Já a tensão de restrição f_t à qualquer ponto na linha neutra por meio da diminuição do comprimento, pode ser definido pela equação a seguir:

$$f_t = kr \Delta c E_c$$

Onde:

Kr = grau de restrição, %;

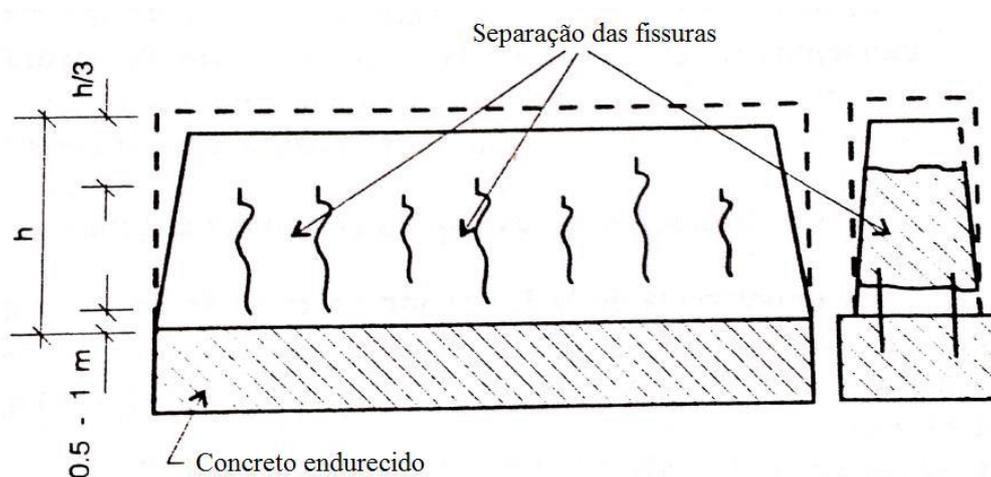
Δc = contração se não houver restrição;

E_c = módulo de elasticidade do concreto quando ocorreu Δc .

2.4.3 Configurações típicas das fissuras por movimentação térmica

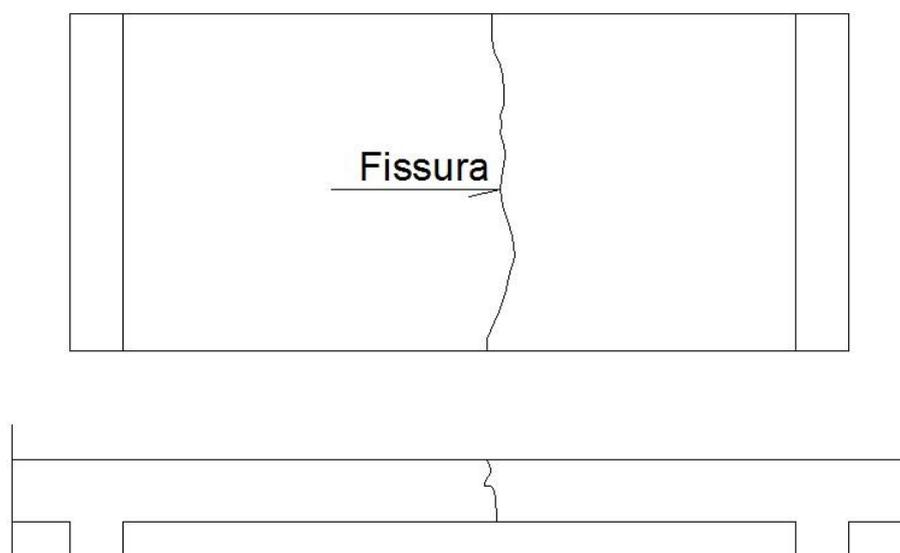
Em seus estudos, Coutinho e Gonçalves (1994) afirmam que fissuras também ocorrem devido as tensões causadas pela diminuição de temperatura relativa àquelas em que se desenvolveu o endurecimento do concreto, principalmente se este estiver com suas deformações limitadas por seus vínculos de ligação. O aparecimento de fissuras térmicas é muito semelhante a fissuras de contração hidráulica, perpendiculares ao eixo principal dos elementos, de largura sem variação, cortando o elemento, definindo assim as fissuras fundamentais de tração que ocorrem na seção transversal do elemento estrutural.

Figura 7 - Fissuração de uma viga por movimentação de origem térmica.



Fonte: Comitê Euro-Internacional Du Béton (1993).

Figura 8 - Ilustração de uma fissura em uma laje devido aos movimentos térmicos



Fonte: Carasek; Cascudo (2013)

2.5 Teoria das falhas

Para que seja possível uma análise de falhas em um modelo estrutural ou em um sistema construtivo, é necessário conhecer o comportamento do material do objeto em estudo, e assim observar as tensões atuantes. Além disso, para efetivar o critério de falhas, há uma demanda para determinar um limite superior do estado de tensão do material. Os materiais comumente utilizados na engenharia podem ser classificados em dois grupos a partir de suas capacidades de absorção de deformações: Materiais Dúcteis e Materiais Frágeis (PFIEL, 2014).

Hibbeler (2010) afirma em seus trabalhos que, apesar de existirem inúmeras teorias para determinar a falha em material, não há nenhuma dessas que possam ser aplicadas diretamente em todas as situações e materiais. Pois o comportamento de um material pode variar entre frágil e dúctil dependendo das condições de contorno, como a taxa de carregamento, ambiente químico, temperatura e processo de concepção.

2.5.1 Tensões principais

Para determinar os resultados dos critérios de falha, é importante conhecer as tensões principais atuante em um plano de tensões, são eles definidas por tensões normais máximas e mínima do plano de tensão em estudo. Assim, expressas por:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2}{4} + \tau_{xy}^2}$$

Onde:

$\sigma_{1,2}$ = tensões normais máxima e mínima;

σ_{xx} = tensão normal a x no plano de tensão;

σ_{yy} = tensão normal a y no plano de tensão;

τ_{xy} = tensões de cisalhamento no plano de tensão.

2.5.2 Critérios de Von Mises

Escoamento em um material dúctil ocorre quando a energia de distorção por unidade de volume do material é igual ou ultrapassa a energia de distorção por unidade de volume do mesmo material quando submetido a escoamento em um ensaio de tração simples (HIBBELER, 2010, p.388).

O círculo de Morh é caracterizado por demonstrar de forma gráfica as teorias também desenvolvidas por Von Mises. Assim, a equação a seguir define o raio do círculo, podendo ser traduzida como a tensão de cisalhamento máxima. A equação posterior representa a relação que deve ser respeitada para que não haja escoamento do material de estudo.

$$|\sigma_1 - \sigma_2| = \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \leq \sigma_e$$

Onde:

$\sigma_{1,2}$ = tensões normais máxima e mínima;

σ_{xx} = tensão normal a x no plano de tensão;

σ_{yy} = tensão normal a y no plano de tensão;

τ_{xy} = tensões de cisalhamento no plano de tensão;

σ_e = tensão de escoamento.

3. METODOLOGIA

Nessa seção são destacados os materiais e a forma como esses foram utilizados. A princípio fez-se uso de um projeto estrutural como forma de estudo para análise estrutural, em seguida, essa estrutura foi expressa em uma modelagem tridimensional por meio do software REVIT 2021, por fim, para então ser realizado a análise estática da estrutura por meio dos métodos dos elementos finitos, foi utilizado o software ANSYS 19.2.

Para esse último passo, foi realizado dois procedimentos de simulação da análise estrutural. Na primeira foi considerada os carregamentos na estrutura e a segundo, além dos carregamentos, foi inclusa a temperatura local da implantação.

3.1 Projeto estrutural

O projeto estrutural utilizado nesse trabalho consiste em uma edificação de uso comercial concebida para a cidade de Russas-CE, da qual levou em consideração as normas pertinentes a este tipo de projeto. São elas:

- ABNT NBR – 6118/2014 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos;
- ABNT NBR – 6120/1980 – Cargas para cálculo de estruturas de edificações;
- ABNT NBR – 7480/1996 – Barras e fios de aço destinado a armadura de concreto armado – Especificações;
- ABNT NBR - 8681/1992 – Concreto para fins estruturais – Classificação por grupo de resistência – Classificação.

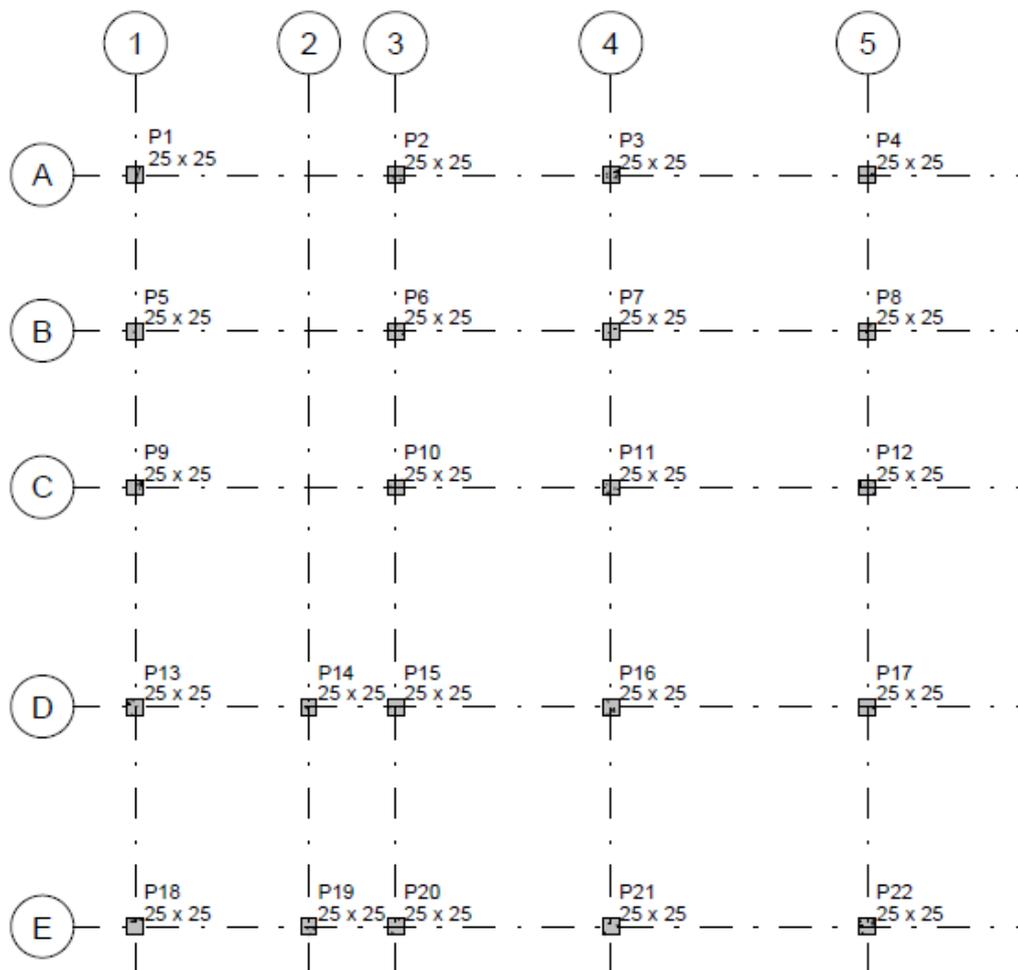
As figuras 10, 11 e 12, representam as plantas do projeto estrutural, já as figuras 13 e 14 consistem nas plantas arquitetônicas na qual foram referência para o lançamento das peças estruturais.

Figura 9 - Modelo estrutural tridimensional.



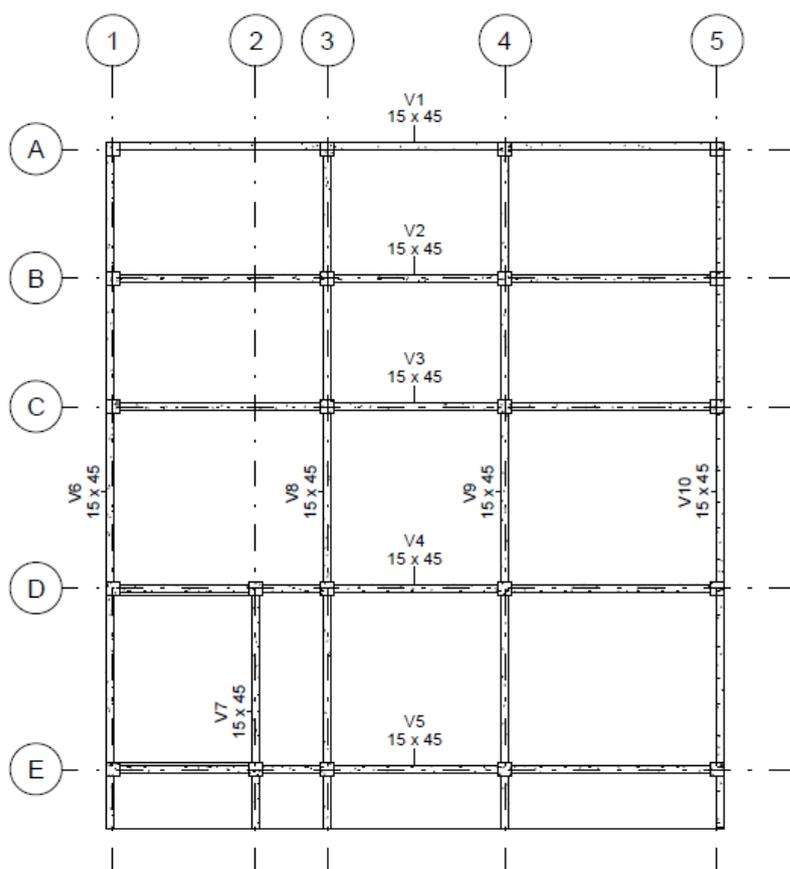
Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 10 - Concepção estrutural do pavimento térreo – Pilares.



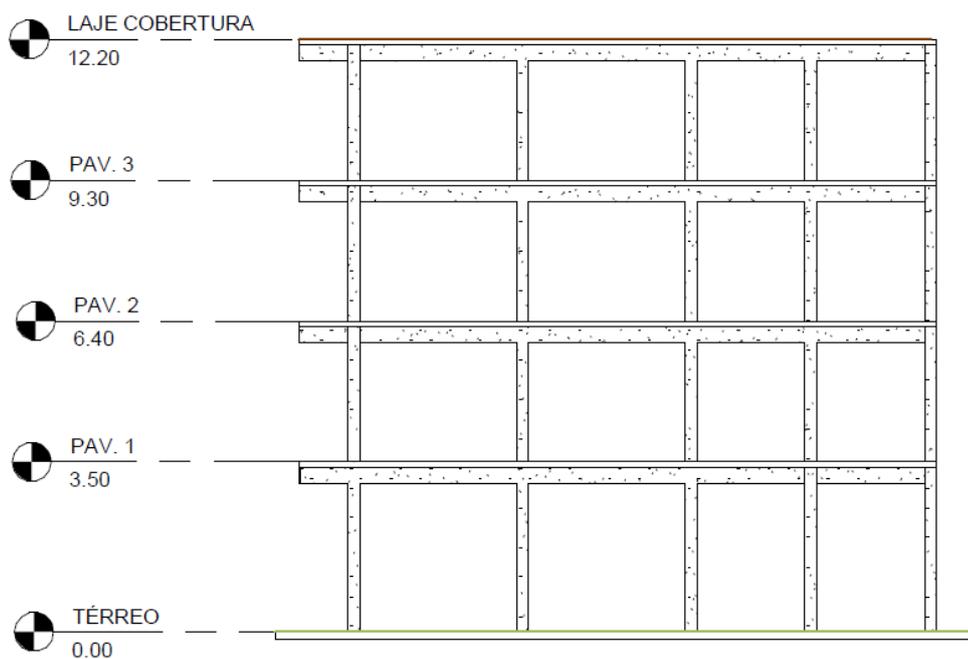
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 11 - Concepção das peças estruturais do pavimento tipo.



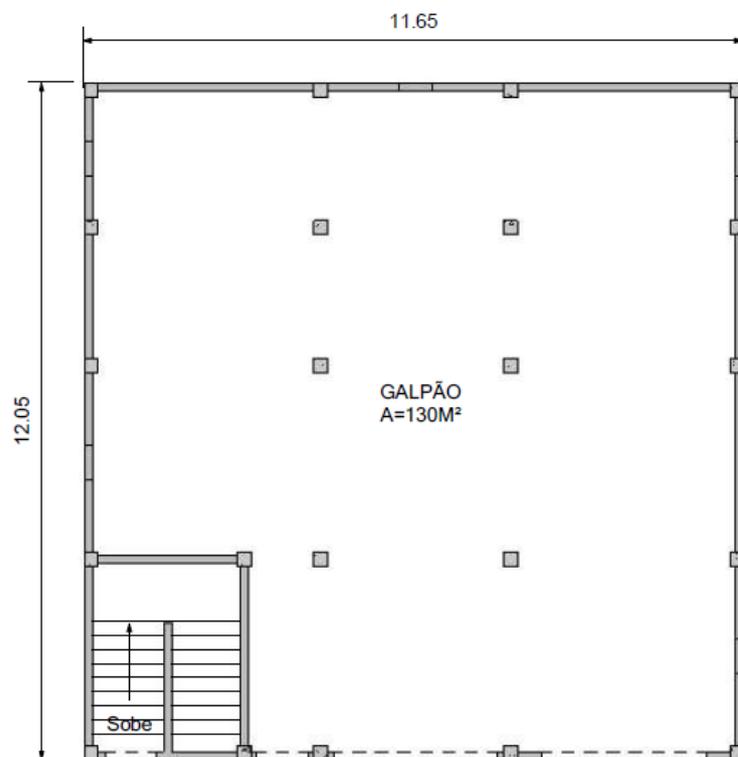
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 12 - Vista de elevação - lateral direita.



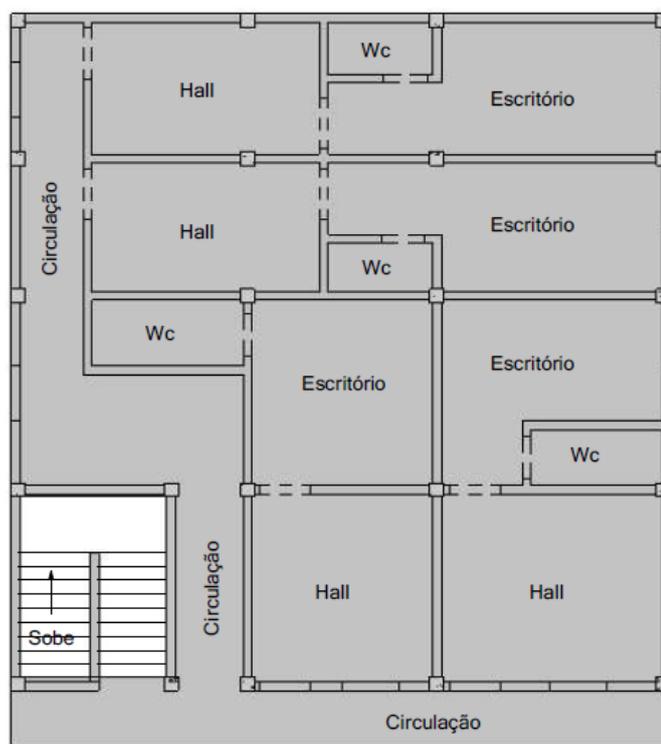
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 13 - Planta arquitetônica do pavimento térreo.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 14 - Planta arquitetônica do pavimento tipo.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.2 Descrição da estrutura

O modelo estrutural apresentado consiste em um edifício de 4 níveis dividido em pavimento térreo e mais 3 pavimentos tipo. O térreo contém pé-direito de 3,5 metros, ao passo que os demais, tipo, abrangem um pé-direito de 2,9 metros(m). As dimensões externas são expressas em 12,05 x 11,65m, o que corresponde a uma área de aproximadamente 140m².

3.2.1 Lajes

As lajes foram todas projetadas em laje maciça com espessura de 0,12m, tendo seu maior vão a vencer de 3,9m no eixo Y e 3,3m na direção X.

3.2.2 Vigas

Análogo as lajes, dentre as vigas, o maior vão a qual foram submetidas é de 3,9m. Sendo todas concebidas de concreto armado com dimensões de 0,15 x 0,45m.

3.2.3 Pilares

Assim como as vigas de dimensões iguais, os pilares também foram projetados com as mesmas dimensões entre si, sendo esses de 0,25 x 0,25m.

3.3 Características dos materiais

3.3.1 Concreto

As considerações quanto ao concreto calculado no projeto foram baseadas na NBR-6118/2014, bem como suas considerações secundárias, aquelas da qual depende da primeira consideração.

Tabela 3 - Característica e propriedade do concreto.

f_{ck} (kgf / cm ²)	350
E_{cs} (kgf / cm ²)	299,8259
E_{ci} (kgf / cm ²)	337,832
f_{ctm} (kgf / cm ²)	32,722
$f_{ctk,inf}$ (kgf / cm ²)	22,905

$f_{ctk,sup}$ (kgf / cm ²)	42,538
f_{ctd} (kgf / cm ²)	16,3607
γ (kgf/m ³)	2500
α (1/°C)	10 ⁻⁵
γ_c	1,4
w_k (mm)	0,3

Fonte: Autoria própria (2021).

3.3.2 Aço

No que se refere a ferragem demandada para esse projeto estrutural, suas considerações também foram fundamentadas pelas normas da ABNT.

Tabela 4 - Característica e propriedade do aço.

f_{yk} (MPa)	500
E_s (GPa)	210
α (1/°C)	10 ^{^(-5)}

Fonte: Autoria própria (2021).

3.4 Qualidade e durabilidade

No projeto em questão, para que sua finalidade de segurança, qualidade e durabilidade sejam atendidas, deve respeitar em suas execuções os pré-requisito definidos à luz das normas vigentes. O mesmo se conserva às cargas aplicadas na estrutura projetada, não havendo abuso em sua utilização, os fins da estrutura serão satisfeitos ao resguardo, principalmente, da NBR-6118/2014.

3.4.1 Agressividade ambiental

A NBR-6118/2014 cita no item 6.4 que o grau de agressividade ambiental pode ser definido pela Tabela 5, classificando assim, seu nível, de acordo com a exposição ambiental da estrutura. Para essa concepção estrutural o grau de agressividade ambiental é coerente com o nível II.

Tabela 5 - Classe de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado
		Respingo da maré	

Fonte: NBR - 6118/2014

3.4.2 Cobrimento do concreto

De acordo com o item 7.4.7.5 da NBR-6118/2014, o recobrimento nominal mínimo sempre se refere à superfície externa da armadura, geralmente a superfície externa do estribo. Assim, a tabela 7.2 da mesma norma, expressa a interação da agressividade ambiental em que a estrutura se encontra exposta, com os cobrimentos. Dessa forma, os cobrimentos utilizados para as vigas e pilares são de 30mm e de 25mm para as lajes.

Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para $\Delta c=10$ mm.

Tabela 6 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para $\Delta c=10$ mm.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50
Concreto Protendido	Laje	25	30	40	50
	Viga/Pilar	30	35	45	55

Fonte: NBR - 6118/2014

3.5 Cargas consideradas

- Peso específico do concreto armado – 2500 Kgf/m³
- Alvenaria de tijolo furado (9x19x19cm) – 1325,63 Kgf/m³
- Revestimento (superior e inferior da laje) – 107,07 Kgf/m³
- Sobrecarga - Laje de piso de escritório – 200 Kgf/m²

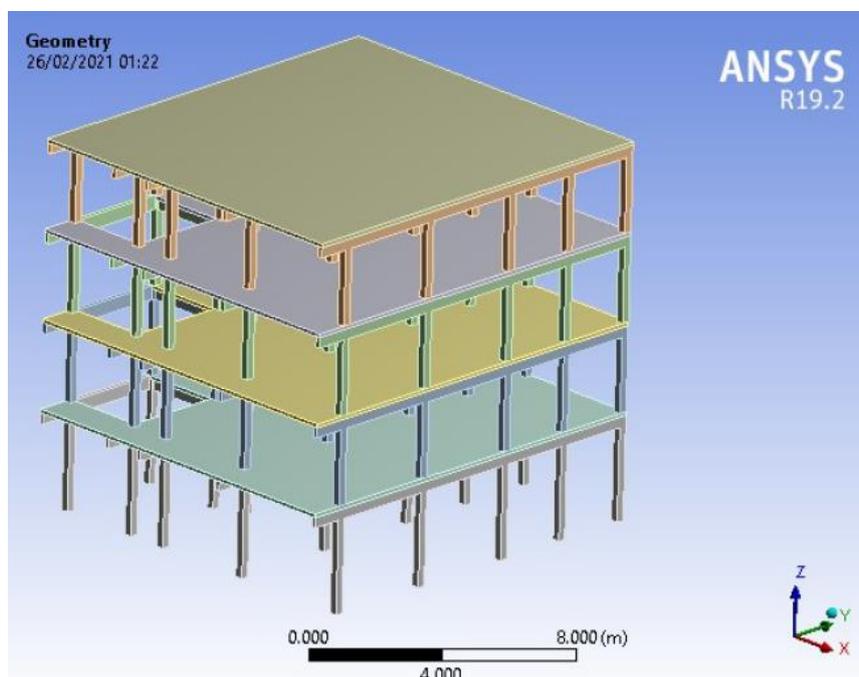
3.6 Simulação numérica

Para a realização da simulação via MEF, o software empregado foi o ANSYS versão 19.2, pois além de possuir um aporte estudantil abundante, sua interface permite uma rápida e intuitiva usabilidade, com a possibilidade de realizar análises estáticas e dinâmicas de materiais com propriedades lineares e não-lineares, com comportamento plástico, elástico ou viscoso.

Quanto ao modelo numérico apresentado nesse trabalho, foi utilizando um elemento pré-definidos e encontrado na própria biblioteca do software.

Apesar da existência, acoplado ao ANSYS, de uma ferramenta de desenho para modelagem dos elementos, utilizou-se do software REVIT 2021 para modelagem das peças estruturais, pois esse software possui uma facilidade de manuseio na concepção de modelagem tridimensional. Logo em seguida, a estrutura modelada foi exportada para plataforma ANSYS por meio da extensão “.stp”. A Figura 9, anteriormente apresentada, é a representação da estrutura modelada por meio do REVIT 2021. Já a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa o modelo estrutural logo após a exportação para o software ANSYS.

Figura 15 - Modelo tridimensional exportado para plataforma ANSYS.



Fonte: Autoria própria (2019).

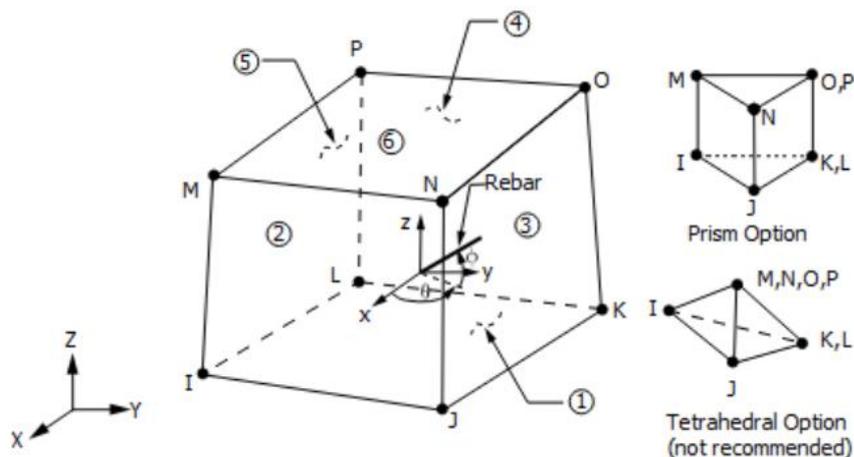
Para efetivação das soluções por meio do MEF, é necessário que se obedeça a uma ordem lógica em seu desenvolvimento. Iniciando com a modelagem numérica do problema em questão, seguindo com a divisão da geometria em uma malha de elementos, logo depois define-se as condições de contorno do problema e então finaliza com as interações dos dados-condições e a coleta dos resultados.

3.6.1 Elemento solid65

O elemento SOLID65 é caracterizado por possuir 8 nós, e em cada, haver três graus de liberdade, sejam eles translações nas direções X, Y e Z. Esse elemento é comumente utilizado em modelagens de peças tridimensionais, que estão sujeitas à interferência de fissuração quando aplicado esforço de tração e esmagamento em situações de compressão.

Esse elemento foi escolhido por propiciar uma simplificação na simulação de elementos de concreto, além disso, ele autoriza o incremento de até três outros tipos de elementos para reforço. Seus formatos podem ser apresentados pela opção de tetraedro, hexaedro ou prisma.

Figura 16 - Modelo tridimensional exportado para plataforma ANSYS.



Fonte: ANSYS (2018).

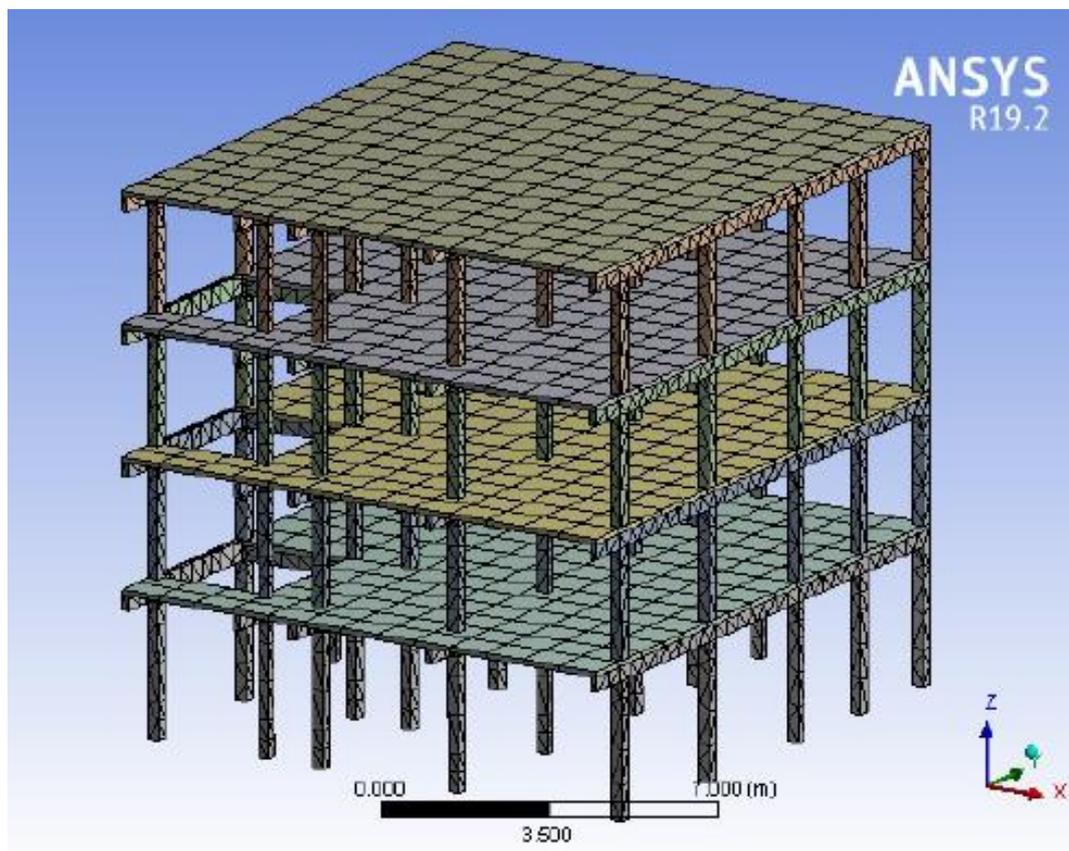
No estudo em questão, fez-se uso do modelo construtivo concreto da qual é associado ao elemento. De acordo com Araújo (2005), o modelo concreto, conhecido por fornecer não-linearidade em seu comportamento, foi proposto por William (1975) e então adaptado para o sistema ANSYS.

3.6.2 Definição da malha dos elementos finitos e discretização

O modelo simulado é composto por três elementos estruturais de concreto: Pilares, vigas e lajes. Todos esses elementos foram discretizados juntos e por meio da malha de geração automática do software ANSYS, ajustando apenas o tamanho da malha para melhores resultados e para que os nós coincidam nas interfaces de contato, fazendo com que a interação entre os elementos seja mais adequada. A Figura 17 representa a estrutura com a malha aplicada aos elementos.

Dessa forma, como percebido na mesma figura, as lajes foram discretizadas em elementos hexaédricos, ao passo em que os pilares e vigas foram por elementos tetraédricos.

Figura 17 - Estrutura em seu modelo discretizado.

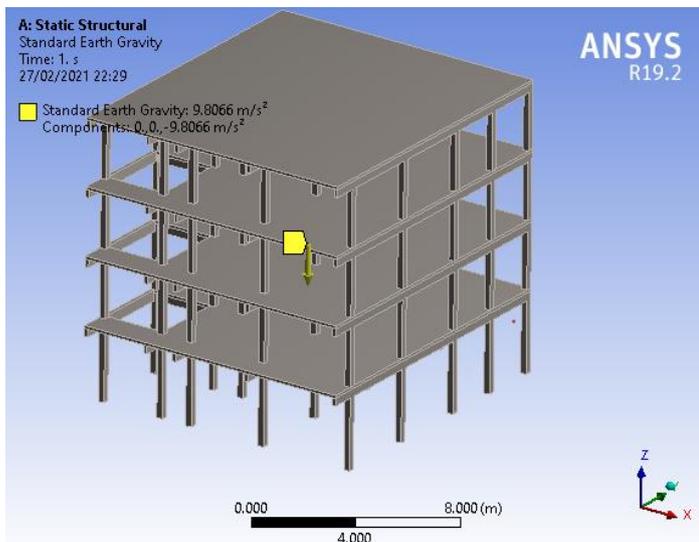


Fonte: Autoria própria (2021).

3.6.3 Aplicação de cargas e condições de contorno

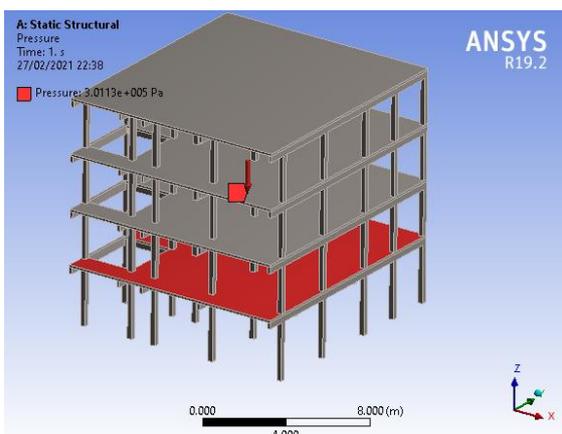
As condições de contorno implementadas na análise fazem referência e semelhanças aquelas aplicadas para concepção do projeto da estrutura em estudo. A Figura 18 mostra a condição de gravidade aplicada ao modelo, em seguida a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa as forças distribuída nos pavimentos, logo após, na Figura 20, pode-se observar as cargas advindas das alvenarias na estrutura. Além desses carregamentos, foi considerado os engastes de suporte fixo aplicado na interação estrutura-fundação. Os valores de esforços nas figuras a seguir, representam as interação e forças individuais apresentadas no item 3.5.

Figura 18 - Ação da gravidade aplicada a estrutura.

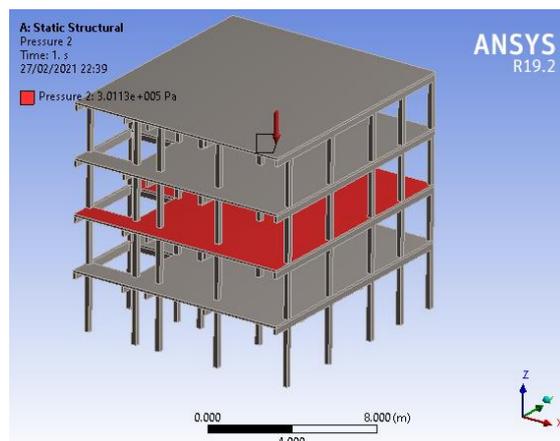


Fonte: Autoria própria (2021).

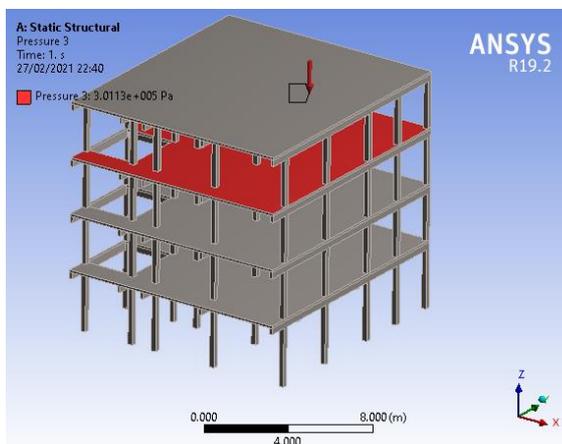
Figura 19 – (a) Forças distribuídas na laje do 1º pavimento, (b) 2º pavimento e (c) 3º pavimento.



(a)



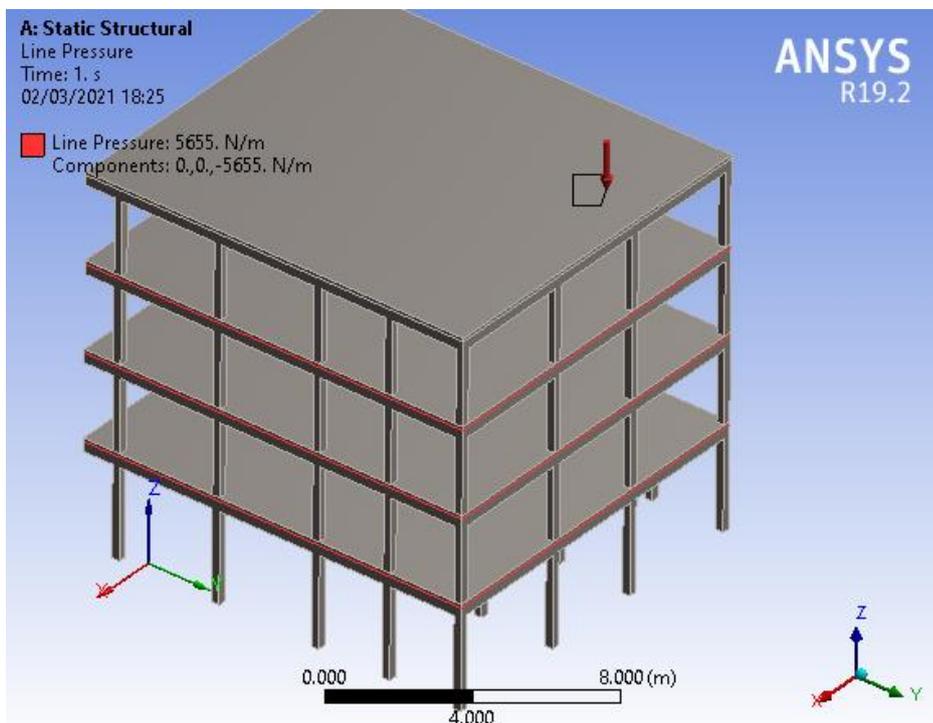
(b)



(c)

Fonte: Autoria própria (2021).

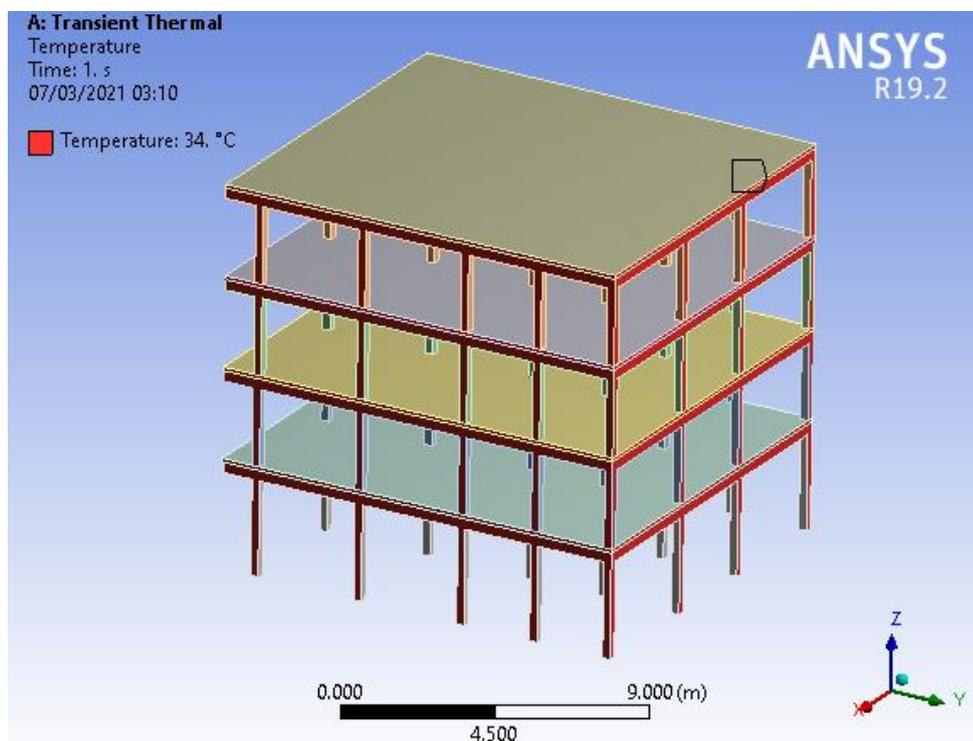
Figura 20 - Cargas devido as alvenarias.



Fonte: Autoria própria (2021).

Para a condição de contorno foco desse estudo, foi aplicado a temperatura de 34° Celsius, fundamentada nos registros de temperaturas máximas médias mensais da cidade de Russas-CE, indicada pela Weather Spark com base nos dados da estação meteorológica do Aeroporto Internacional de Fortaleza. A considerar a localização da implantação da estrutura e o período do dia de maior incidência da temperatura, pode-se observar que as faces da lateral direita e fachada posterior estarão expostas a essa temperatura. Desse modo, a temperatura simulada no ANSYS foi adicionada aplicada diretamente nessas faces, como mostra a Figura 21.

Figura 21 - Temperatura aplicada incidindo nas faces lateral direita e posterior.



Fonte: Aatoria própria (2021).

4. RESULTADOS

4.1 Análise estática

Na análise estática da estrutura foram observadas as deformações, tensões principais atuantes e tensões de Von Mises. As figuras apresentadas nessa seção demonstram os resultados para cada um desses parâmetros.

4.1.1 Deformação

As deformações resultantes neste trabalho em um primeiro caso, sem a influência da temperatura, contemplam apenas os esforços atuantes e descritos no item 3.5. Seus valores são aqueles encontrados nos dimensionamentos recorrentes, mais comuns em análises estruturais, sem considerar algumas condições de contorno. Em uma segunda análise, com os mesmos carregamentos da primeira, foi considerada a temperatura incidente de 34° Celsius.

Dos resultados da primeira análise, obteve um valor máximo de 7,5981 mm/m , sendo visualmente mais expresso nos pilares centrais e principalmente no pavimento térreo. Isso ocorre devido esses pilares centrais receberem a maior parte dos carregamentos atuantes, diferentemente dos pilares de borda. A deformação mínima de $2,4243 \times 10^{-3} mm/m$ é encontrada na laje de cobertura da estrutura, como mostra a figura 22. A tabela a seguir dispõe as deformações máximas de cada elemento estrutural para cada pavimento.

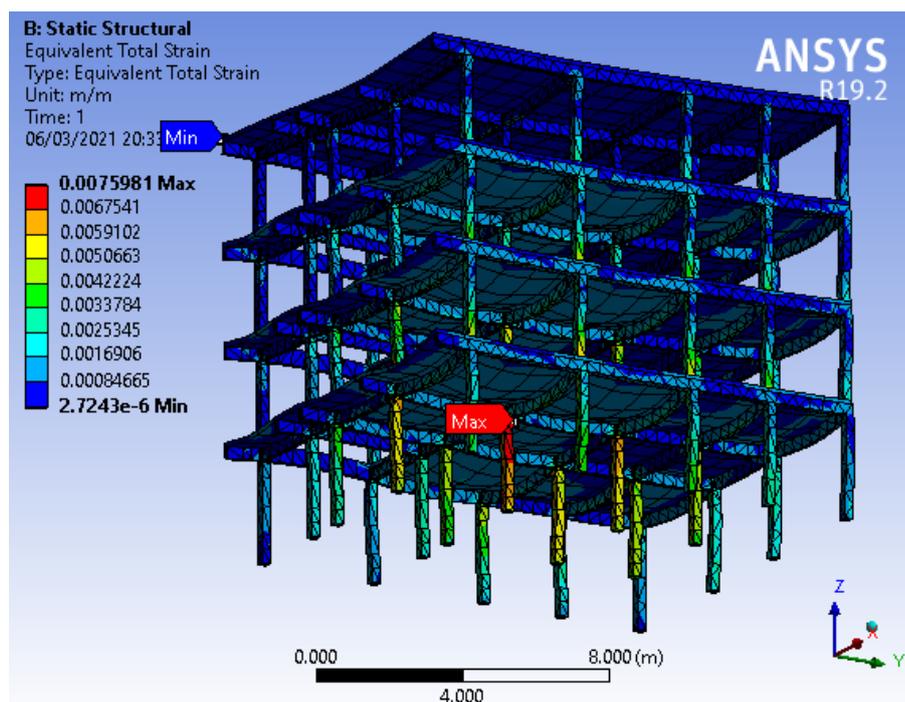
Tabela 7 - Deformações máximas sem a inclusão da temperatura.

Pavimentos	DEFORMAÇÕES MÁXIMAS (mm/m)		
	PILARES	VIGAS	LAJES
1° Pavimento	7,5981	6,227	2,2141
2° Pavimento	6,0778	4,0194	2,0592
3° Pavimento	5,3277	3,8253	1,6062
4° Pavimento	3,1042	1,0159	0,14922

Fonte: Autoria própria (2021).

De forma geral, os elementos mais afetados pela deformação foram os pilares, seguido das vigas e lajes. Isso ocorre pois os carregamentos gerados nas lajes são repassados para as vigas e então transitados para os pilares, conforme a literatura.

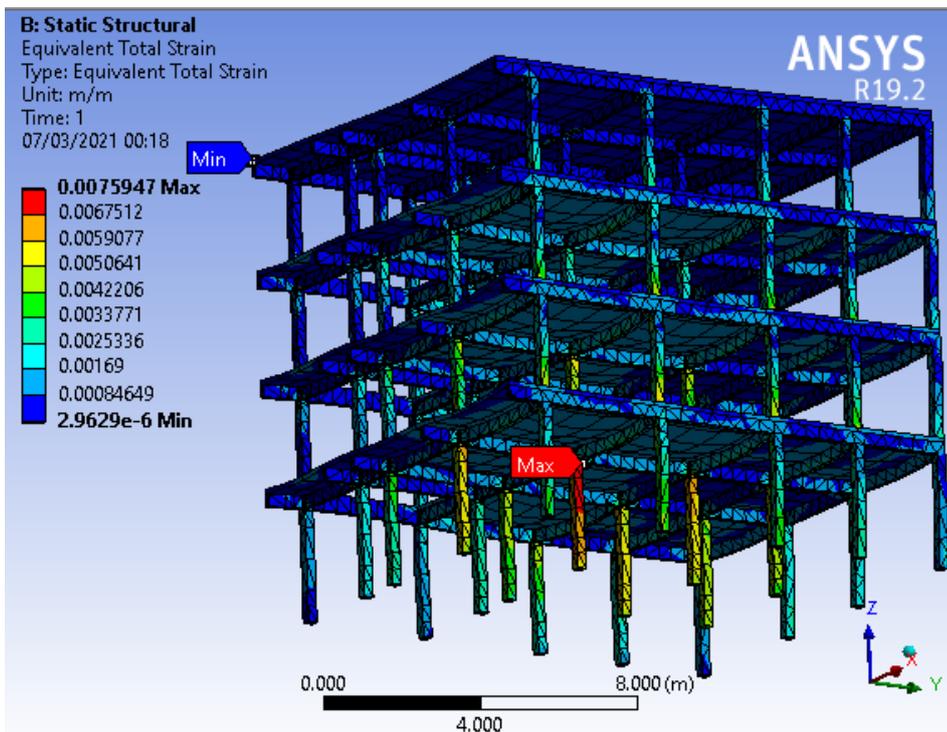
Figura 22 - Resultado da deformação sem a temperatura aplicada.



Fonte: Autoria própria (2021).

Na análise realizada com incremento de temperatura, a estrutura alcançou um valor máximo de $7,5947 \text{ mm/m}$ e mínimo de $2,9629 \times 10^{-3} \text{ mm/m}$. Resultados próximos à primeira simulação, sendo levemente menor e maior consecutivamente. Os locais desses resultados se mantiveram o mesmo da primeira simulação na estrutura. Assim, é percebido que a deformação na laje de cobertura não varia tanto com o incremento da temperatura, devido esta não ser atingida diretamente pela insolação, pois a edificação conta com um sistema de cobertura em sua arquitetura.

Figura 23 - Resultado da deformação com a temperatura aplicada.



Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.2 Tensões principais

O estudo apropriou-se também de expressar os resultados das tensões máximas principal e mínimas principal da estrutura. Dos valores resultantes para os dois cenários, com e sem temperatura, pôde notar uma variação nas tensões máximas principal, porém em comparação com a tensão mínima principal, essa última obteve uma maior variação. As figuras a seguir demonstra os resultados pertinentes a essa observação.

Mas antes, deve se destacar que essas tensões são referentes as tensões σ_1 e σ_2 do círculo de Mohr. Sendo σ_2 a tensão mínima principal e σ_1 a tensão máxima principal. Seus valores podem ser positivos, representando uma tensão de tração, e negativos como tensão de compressão.

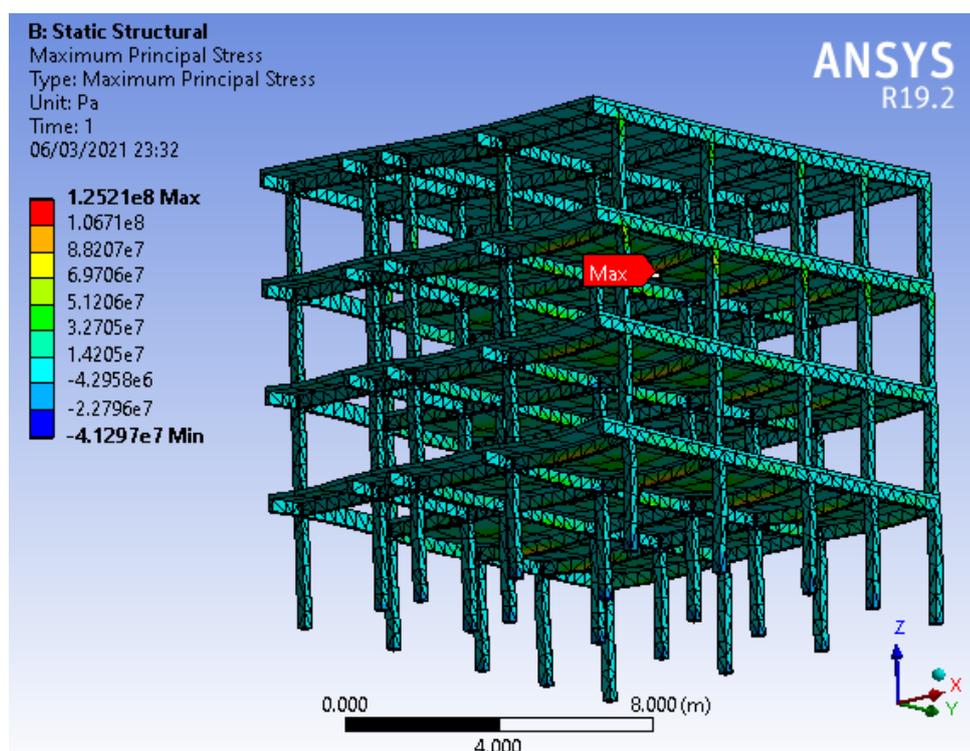
Os resultados mostram, ainda, que a tensão σ_1 na estrutura é dominada pela tensão de tração, ao passo que σ_2 é dominada pela tensão de compressão.

A máxima tração ocorre em elementos pontuais de vigas do térreo, segundo e terceiro pavimento, principalmente por essas apoiarem as duas lajes de maior vão do pavimento a cima do seu.

As maiores tensão de compressão da estrutura é encontrada no pavimento térreo nos elementos centrais de pilares. Seu maior resultado é destacado em um pilar que, assim como as vigas que toleram a maior tração na estrutura, suportar os carregamentos das lajes de maiores dimensões dos pavimentos a cima.

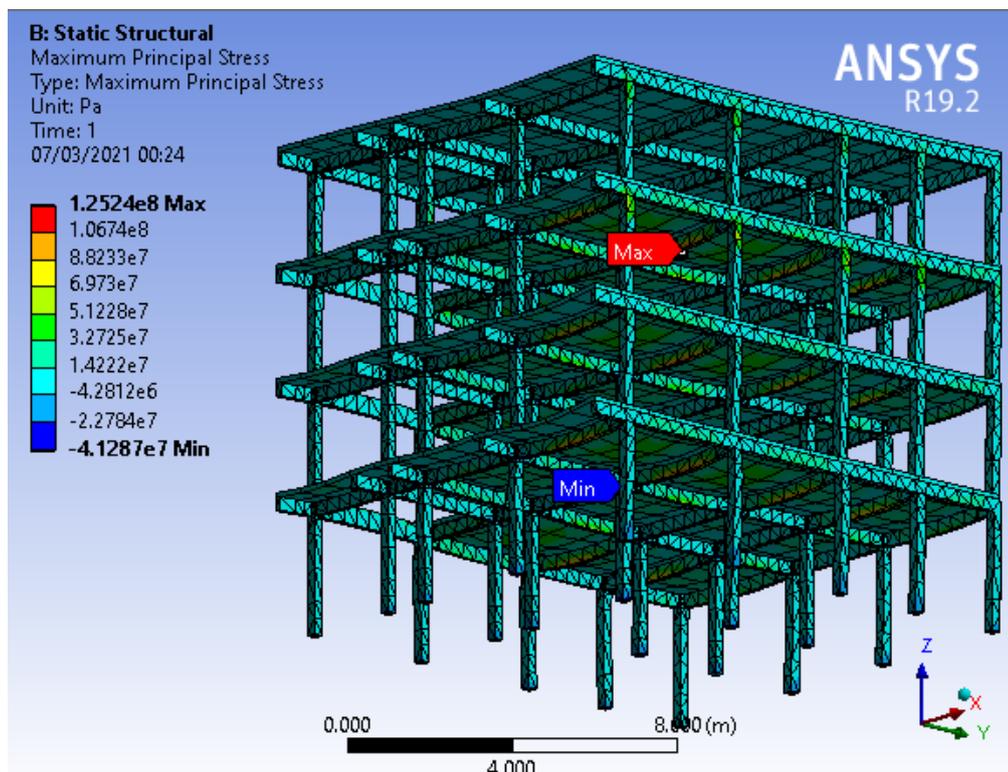
A localização da máxima tensão de tração e compressão se mantiveram a mesma para as duas situações: com e sem temperatura aplicada. Seus valores estão expressos de forma resumida no fim desta seção, na tabela 8. Assim como suas variações para os dois casos.

Figura 24 - Resultado da tensão principal máxima - sem temperatura aplicada.



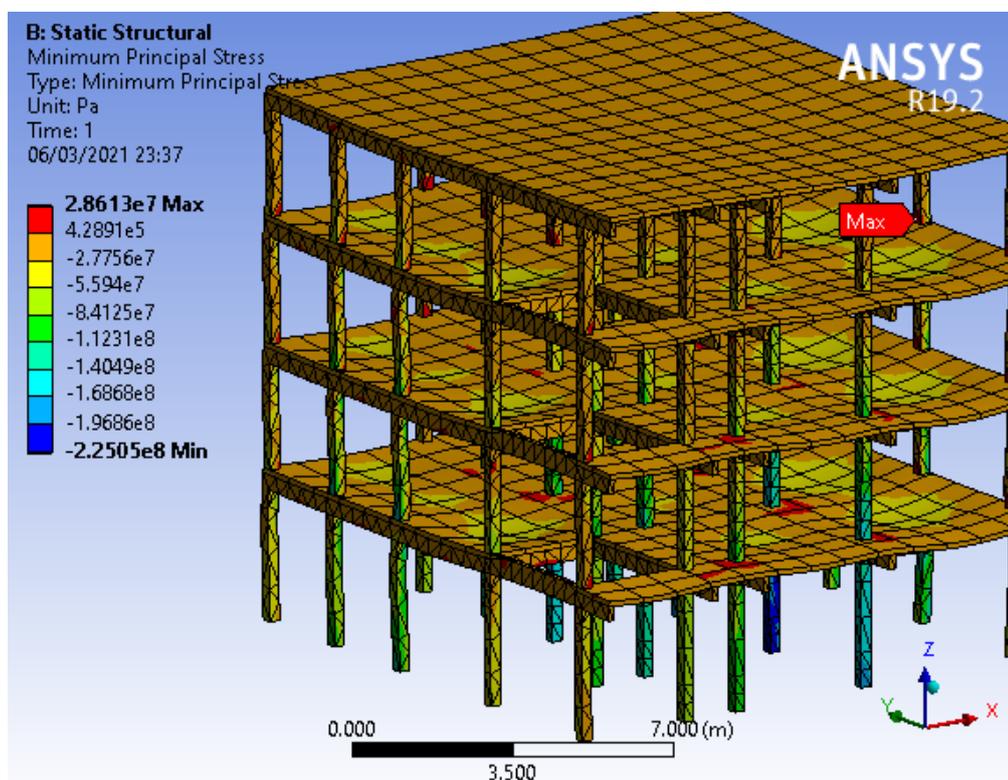
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 25 - Resultado da tensão principal máxima - com temperatura aplicada.



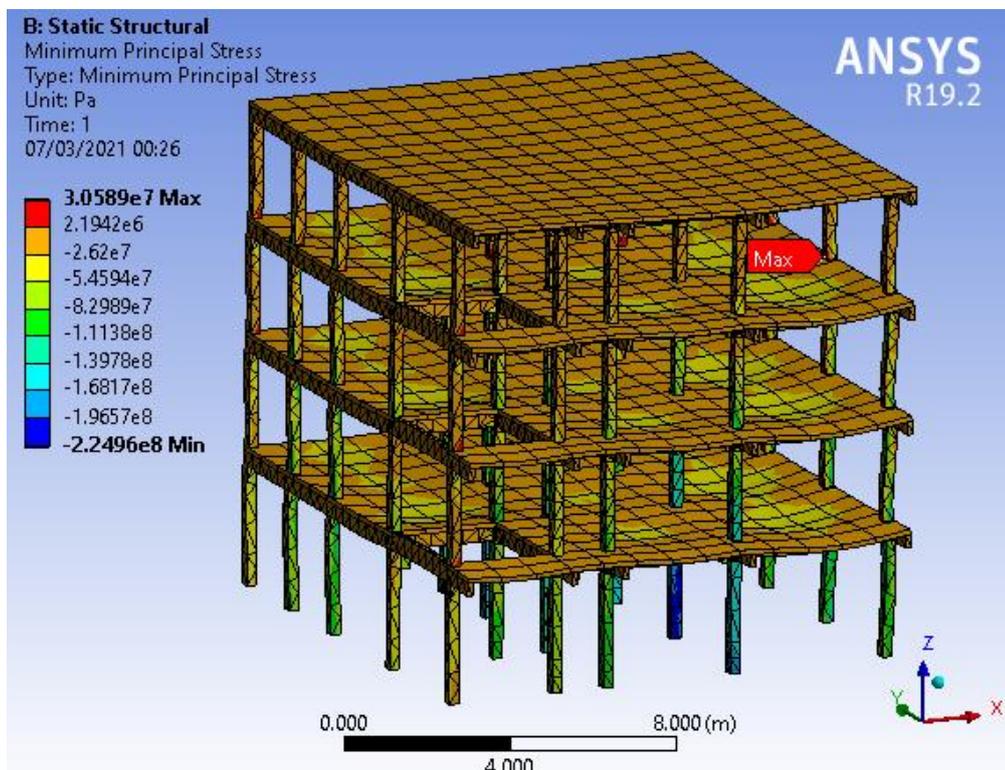
Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 26 - Resultado da tensão principal mínima - sem temperatura aplicada.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 27 - Resultado da tensão principal mínima - com temperatura aplicada.



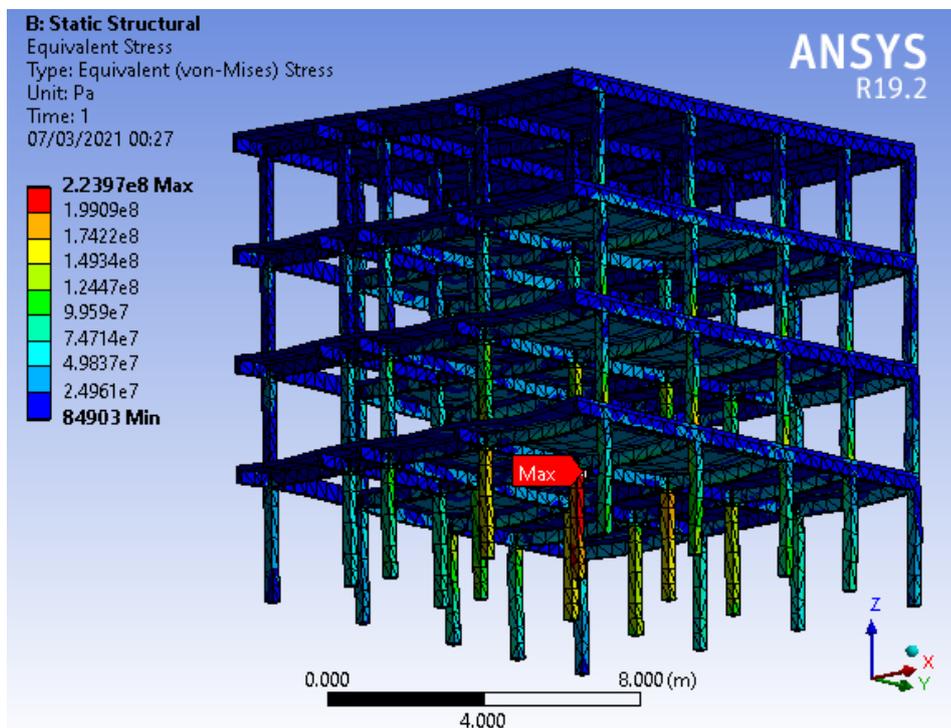
Fonte: Autoria própria (2021).

4.1.3 Tensão de Von Mises

As tensões de Von Mises encontrados na análise e representada na Figura 28 são em relação àquela onde não houve a inclusão da temperatura na simulação. Para esse caso, o valor máximo resultante dessa tensão é de $223,97 \text{ MPa}$, enquanto mínimo expressa valor de $63,334 \text{ MPa}$. A figura ainda apresenta as tensões de Von Mises para os componentes da estrutura, nela é possível notar que a máxima tensão ocorre em um pilar do pavimento térreo.

Portanto, esse pilar onde expressa a maior tensão de Von Mises, é o ponto mais crítico da estrutura. Ele seria o primeiro elemento a alcançar o ELU. Analisando os resultados desse parâmetro com as tensões atuantes na estrutura, é observado uma relação entre as duas. Onde o pilar em questão é o mais solicitado a resistir aos carregamentos, satisfazendo a coerência dessa relação.

Figura 28 - Resultado da tensão de Von Mises - sem temperatura aplicada.



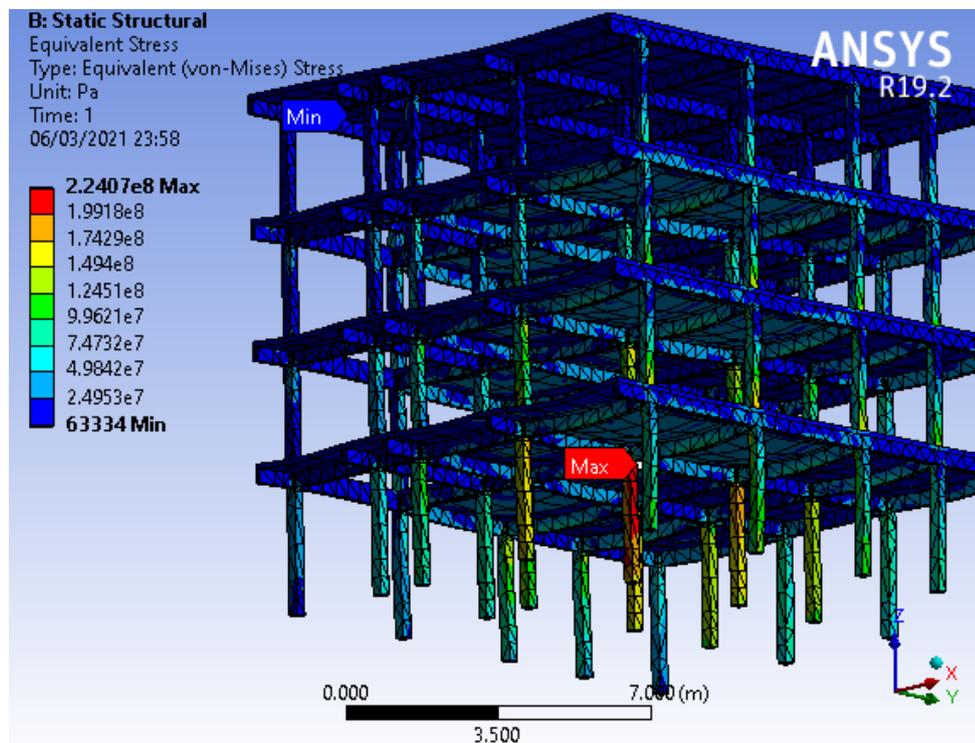
Fonte: Autoria própria (2021).

Quando analisada a partir da perspectiva de aplicação da temperatura incidente na estrutura, os valores de Von Mises adquirem uma variação. Dessa variação pode constatar que a máxima tensão de Von Mises aumenta para esse novo caso, sendo deparada com um resultado de 224,07 MPa.

A figura 29 apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da temperatura. Nota-se que o local do resultado máximo é preservado.

A variação obtida nas tensões máximas de Von Mises entre as duas análises é da ordem de 0,1MPa. Onde seu valor se torna maior com o incremento da temperatura. Essa alteração é entendida como o aumento da probabilidade de a estrutura falhar, pois sua tensão equivalente de Von Mises estará mais próxima da tensão de resistência da estrutura.

Figura 29 - Resultado da tensão de Von Mises - com temperatura aplicada.



Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados obtidos pela análise estrutural estática podem ser analisados pela tabela a seguir. Para fins de simplificação, ela expressa apenas os valores máxima para cada parâmetro, julgados mais importantes para a análise global do projeto. Os valores encontram-se em confronto entre as duas situações analisadas: com e sem temperatura incidente na estrutura.

Tabela 8 - Resultado dos parâmetros considerados na análise estática.

Efeito da temperatura de 34 °C	Deformação (mm/m)	σ_1 (Mpa)	σ_2 (Mpa)	Von Mises (MPa)
Não	7,5981	125,21	224,96	223,97
Sim	7,5947	125,24	225,05	224,07
Varição em módulo	0,0034	0,03	0,09	0,1
Varição (%)	0,0447	0,0239	0,04	0,0446

Fonte: Autoria própria (2021).

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou a análise estrutural do projeto de uma edificação de 4 pavimentos para uso comercial na cidade de Russas-CE. O intuito foi de verificar seu comportamento estrutural para condições estáticas em dois cenários: sem e com a influência da temperatura local incidente na estrutura.

Dos parâmetros referentes a análise estática, temos a deformação com sendo a primeira verificação. Dessa, pôde notar que para esses casos não houve mudanças significativas que pudessem impactar o comportamento da estrutura de forma global. Apesar disso, há um fato importante que pode ser verificado na tabela 8. A deformação máxima encontrada diminui, mesmo que pouca, com o aumento da temperatura. Isso acontece devido a influência da temperatura na deformação de expansão do pilar contrapor as deformações de compressão advindas das cargas atuantes.

Em seguida, com os resultados obtidos das tensões principais atuantes, percebe-se que o maior valor da máxima principal na estrutura obteve um leve acréscimo com a incidência de temperatura local. Da mesma forma, ocorreu uma variação na mínima principal. Assim, de posse desses efeitos, é possível destacar que o acréscimo da tensão de tração atuante é influenciado pela temperatura por meio da dilatação térmica das peças. A tensão de compressão é destacada por um aumento maior que a de tração, sendo o grau desse aumento conduzido e influenciado pela forma de interação das peças estruturais.

O último parâmetro observado na análise estática foram as tensões equivalentes de Von Mises onde, com a temperatura, houve um aumento de 0,0446%, deixando a estrutura mais próxima de sofrer falhas. Ocorre que o aumento das tensões atuantes são proporcionais com Von Mises. Dessa forma, é observado o impacto adverso da temperatura na estrutura e a importância de considerá-la em análises.

Todos os resultados para a incidência da temperatura encaminham a estrutura para um estágio mais próximo ao quadro de fissuração, seja pelo aumento

das tensões internas atuantes, gradiente de temperatura nas faces e até mesmo a fadiga ocasionada pela variação de temperatura ao longo do dia. Com isso, a estrutura fica em alerta quanto a perda de desempenho.

É notado também, que o impacto dos resultados depende da intensidade das condições ambientais aplicada na estrutura e do grau de liberdade das peças estruturais. Pois quanto menos engastada, como é o caso do projeto em estudo, a estrutura possui um maior grau de liberdade para realizar movimentos devido a variação de temperatura. Sendo assim, não possuindo mudanças extraordinárias nas tensões estudadas.

Deve-se salientar também que, apesar dos valores não possuírem mudanças significativas nos resultados, eles pertencem ao projeto de estudo deste trabalho com suas características locais. Destacando assim, a forma única de cada projeto estrutural e a importância de serem analisadas para as condições de contorno do ambiente de implantação da estrutura.

Com isso, para as sugestões de trabalhos posteriores, é interessante a realização da análise estrutural com implemento de condições de umidade do ambiente, assim como também em conjunto com a temperatura local. E ainda realizar um estudo desses parâmetros para diferentes tipos de vínculos da estrutura.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6120: Carcas para o cálculo de estruturas de edificação**. Rio de Janeiro, 1980.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7480: Barras e fios de aço deslimado a armadura de concreto armado**. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8681: Concreto para fins estruturais**. Rio de Janeiro, 1992.
- AMORIN, N. C.; **Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília – UNB. Brasília, 2012. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/11251>. Acesso em: 04 de Fev. 2021.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. 2006. Notas de Aula. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Bauru, 2006, 98p.
- CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado segundo a NBR 6118:2014**. 4ª ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014.
- HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- KIMURA, Alio. **Informática aplicada em estruturas de concreto armado: cálculo de edifícios com o uso de sistemas computacionais**. 1ª edição, São Paulo, Editora Pini, 2007.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M.; **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.
- OLIVEIRA, D. F. J.; **Análise estrutural de um edifício em concreto armado com quatro pavimentos: estudo de caso para diferentes modelos estruturais**. Dissertação de bacharel. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Pato Branco, 2015. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/14474/3/PB_COECI_2015_1_11.pdf. Acesso em: 05 de fev. 2021.
- OLIVEIRA, F. R. X.; **Análise estática e dinâmica de uma edificação residencial em concreto armado com a utilização de coeficiente de mola nas fundações**. Dissertação de Especialização. Universidade Cidade de São Paulo Federal - UNICID, São Paulo: 2016. Disponível em: <http://estruturasonline.com.br/download>. Acesso em: 08 de fev. 2021.

PINHEIRO, Libânio Miranda. **Noções sobre pré-dimensionamento de estruturas de edifícios**. 1985. Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

SILVA, M. T. Q. S.; **Análise térmica transiente e de tensões em estruturas executadas em camadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba: 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/12879/1/Arquivototal.pdf>. Acesso em: 08 de fev. 2021.

SILVA, S.; **Introdução ao Método dos Elementos Finitos**. Notas de aula. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Foz do Iguaçu: 2009.

SORIANO, H. L.; LIMA S. S. **Método dos elementos finitos em análise de estruturas**. 392 p. 1998.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza, 2013.

VIEIRA, W. H.; **Modelagem numérica de estruturas de concreto com variação de temperatura**. Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Civil – FECIV; Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/23507>. Acesso em 01 de Fev. 2021.