



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ALEXANDRE CONRADO MAIA VIDAL

MODELAGEM E MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE
FUNDAÇÕES VOLUMOSAS

FORTALEZA
2022

ALEXANDRE CONRADO MAIA VIDAL

MODELAGEM E MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE
FUNDAÇÕES VOLUMOSAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Civil do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como exigência parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Feitosa de
Albuquerque Lima Babadopulos

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

V691m Vidal, Alexandre Conrado Maia.
Modelagem e monitoramento do comportamento térmico de fundações volumosas / Alexandre Conrado
Maia Vidal. – 2022.
77 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.

1. Simulações térmicas. 2. Fundações de concreto. 3. Trocas de calor. I. Título.

CDD 620

ALEXANDRE CONRADO MAIA VIDAL

MODELAGEM E MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE
FUNDAÇÕES VOLUMOSAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como exigência parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em: 03 / 02 / 2022 .

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucas Babadopulos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Eduardo Cabral
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rafael Pileggi
Universidade de São Paulo (USP)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelas conversas rápidas à noite, e pelo equilíbrio entre pedir e agradecer.

Aos meus pais, Syrlene e Arimatéia, pelo apoio incondicional, pelo respeito às minhas decisões e pelo esforço em me oferecer tudo de melhor que puderam.

À minha irmã, Isadora, por estar sempre perto mesmo quando eu estou longe, e me motivar tanto sem nem saber.

À minha família, em especial meus avós Zulene e Odorico, meus tios Syrley e Charliano, minha prima Nayanne, minha tia Albetiza, por todo o apoio e ajuda.

À minha avó Escolástica, que vai assistir o neto se formar de outro plano da existência.

Ao meu orientador, professor Lucas Babadopulos, por todo o apoio e parceria em mais de dois anos de orientação, obrigado por acreditar no meu potencial, por me ouvir e me respeitar, por sempre subir a barra acreditando que eu posso produzir mais e melhor.

Ao professor Eduardo Cabral, pela primeira oportunidade no Laboratório de Materiais, e pelo apoio e ajuda por toda essa caminhada.

Aos amigos que eu fiz na UFC e pretendo levar pra vida, por ouvirem minhas angústias e aguentarem minhas piadas ruins, em especial Wanderson, Brenda, Levi, Daniel, Luzardo, Jéssica, Luís Paulo.

Aos amigos e membros do ReoM, por todas as discussões, aprendizado, conhecimento passado, em especial à Amanda Machado, por todo o trabalho e sofrimento dividido neste último ano de projeto de pesquisa.

À equipe do LMCC pelo suporte em diversas empreitadas, principalmente ao Helano Wilson, que para além de técnico foi meu amigo, e que para além de explicar ensaios, me acolheu e salvou vários dias ruins meus.

À equipe do INCT-Asfalto, pelo suporte em diversos momentos e pela paciência, em especial Annie e Iolanda.

À UFC, por ter sido uma casa pra mim nos últimos anos, e por me permitir conhecer e trabalhar com pessoas incríveis.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos fornecida, que me permitiu dedicar tempo à pesquisa e ao desenvolvimento deste trabalho, e me permitir trabalhar com algo que amo: ciência.

“Faça ou não faça. Tentativa não há.”

Star Wars.

RESUMO

Com o crescimento da instalação de parques eólicos no Nordeste, movidos pelo potencial da região e pelos investimentos em busca de uma matriz energética mais sustentável, surge a necessidade de estudo das fundações de torres eólicas. Estas consistem em blocos de concreto massa que, devido ao seu grande volume, às reações exotérmicas de hidratação do cimento e à baixa capacidade do concreto de dissipar calor, correm o risco de atingir altas temperaturas, levando à ocorrência de manifestações patológicas, especialmente as fissuras térmicas e a formação de etringita tardia. Para evitar tal fato, durante a fase de projeto devem ser feitas simulações para estimar o aquecimento e, durante a construção, tomar medidas para evitar que se atinjam essas temperaturas nocivas, cujo acompanhamento deve ser feito por monitoramento após a construção. Este trabalho tem por objetivo contribuir para a modelagem térmica dessas fundações, de modo a ajudar no entendimento dos fenômenos internos que ocorrem nessas estruturas, avaliando o impacto de diferentes perfis calorimétricos para as temperaturas atingidas, aprimorando a representação das condições de contorno provenientes do ambiente para avaliar o impacto destas nas trocas de calor. Por fim, a partir de dados de fundações reais, foram feitas considerações acerca dos fenômenos de troca de calor entre a estrutura e o entorno, e como os fatores do meio exercem sua influência. Um modelo tridimensional da geometria da fundação foi feito para análises térmicas transientes, e a partir dele, estudos paramétricos foram realizados, alterando a curva de calorimetria, a velocidade dos ventos e a temperatura ambiente. Em seguida, foram comparados os dados de estruturas reais construídas em diferentes ambientes para corroborar os resultados das simulações. Assim, obtiveram-se relações de previsão do comportamento das temperaturas das fundações a partir das curvas calorimétricas do ligante, uma análise das condições climáticas e do seu impacto nas trocas de calor, além de considerações sobre os gradientes térmicos formados na fundação. O estudo de caso respaldou a diferença provocada pela consideração das condições climáticas de maneira mais realista, serviu como parâmetro para comparação com as simulações e mostrou a diferença no resfriamento de estruturas em diferentes ambientes.

Palavras-chave: Simulações térmicas. Fundações de concreto. Trocas de calor.

ABSTRACT

With the growth of the installation of wind farms in the Northeast region, driven by the potential of the region and by investments in search of a more sustainable energy matrix, there is a need to study the foundations of wind towers. These consist of mass concrete blocks that, due to their large volume, the exothermic reactions of cement hydration and the low capacity of concrete to dissipate heat, run the risk of reaching high temperatures, leading to the occurrence of pathological manifestations, especially thermal cracks and delayed ettringite formation. To avoid this, during the design phase, simulations must be carried out to estimate the heating and, during construction, measures must be taken to avoid reaching these harmful temperatures, which must be followed up by monitoring after construction. This work aims to contribute to the thermal modeling of these foundations, in order to help in the understanding of the internal phenomena that occur in these structures, evaluating the impact of different calorimetric profiles for the temperatures reached, improving the representation of the boundary conditions coming from the environment to evaluate their impact on heat exchange. Finally, based on data from real foundations, considerations were made about the phenomena of heat exchange between the structure and the surroundings, and how environmental factors exert their influence. A three-dimensional model of the foundation geometry was made for transient thermal analysis, and from it, parametric studies were performed, changing the calorimetry curve, wind speed and ambient temperature. Then, data from real structures built in different environments were compared to corroborate the simulation results. Thus, relationships for predicting the behavior of foundation temperatures were obtained from the calorimetric curves of the binder, an analysis of climatic conditions and their impact on heat exchanges, in addition to considerations on the thermal gradients formed in the foundation. The case study supported the difference caused by considering the climatic conditions in a more realistic way, served as a parameter for comparison with the simulations and showed the difference in the cooling of structures in different environments.

Keywords: Thermal simulations. Concrete foundations. Heat exchanges.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Aumento das dimensões de torres eólicas e rotores	13
Figura 2 — Exemplos de aplicações do concreto massa: pilares de pontes (a) e barragens (b)	17
Figura 3 — Soluções para controle de temperaturas: tubos de resfriamento (a) e concretagem em camadas (b).....	18
Figura 4 — Efeito do aumento da condutividade térmica na temperatura no centro (a) e.....	19
Figura 5 — Distribuição de tensões para valores de 0,5 (a) e 1,2 (b) W/m.°C de	20
Figura 6 — Formação de etringita tardia na interface entre.....	21
Figura 7 — Deformação provocada por etringita tardia nas direções transversal e longitudinal de amostras de concreto.....	22
Figura 8 — Tensões de origem térmica (“Thermal stress”) geradas por gradiente térmico e tensões de tração admissíveis (“Allowable stresses”) ao longo do tempo (“Time”) após a concretagem.....	23
Figura 9 — Tensões térmicas no centro (a) e superfície (b) de amostras de concreto com diferentes espessuras de placas de restrição	24
Figura 10 — Perfil calorimétrico do cimento.....	25
Figura 11 — Perfis calorimétricos para cimentos CP-IV de diferentes fabricantes.....	26
Figura 12 — Resultado de simulação térmica em modelo bidimensional	27
Figura 13 — Resultado de simulação térmica em modelo tridimensional.....	28
Figura 14 — Modelo de elementos finitos de concreto (a) e armadura (b) de muro de contenção.....	28
Figura 15 — Relações empíricas entre h_c e velocidade do vento.....	30
Figura 16 — Fluxograma de etapas metodológicas	31
Figura 17 — Geometria (a), dimensões da fundação em metros (b) e camada de solo (c).....	32
Figura 18 — Perfis de liberação de calor ao longo do tempo (a) e de calor acumulado (b)	33
Figura 19 — Temperaturas ao longo do tempo	35
Figura 20 — Velocidade do vento em Fortaleza	36
Figura 21 — Esquema de posicionamento dos termopares.....	36
Figura 22 — Dimensões da laje de reação, em metros (a) e esquema de posicionamento dos termopares (b).....	37
Figura 23 — Etapas intermediárias da construção do modelo da fundação.....	39
Figura 24 — Simulações do estudo de convergência (a), com ampliações das máximas (b) ..	41
Figura 25 — Maiores e menores malhas testadas durante o estudo de convergência.....	43
Figura 26 — Modelo parcial da fundação	43
Figura 27 — Esquema de posicionamento de pontos de aquisição de dados nas simulações .	44
Figura 28 — Resultados simulados para análise dos pontos de P1 a P4 (a), de P5 a P8 (b) e de P9 a P15 (c)	45
Figura 29 — Resultado das simulações com CP III para três teores de aditivo polifuncional.	47
Figura 30 — Estudos de regressão linear para as amostras de CP III	48
Figura 31 — Resultado das simulações com CP V para três teores de substituição por	50
Figura 32 — Estudos de regressão linear para as amostras de CP V	51
Figura 33 — Resultado das simulações para diferentes amplitudes térmicas nos pontos P7 ..	53
Figura 34 — Diferença de temperatura entre os pontos P7 e P14.....	54
Figura 35 — Gradiente térmico entre os pontos P7 e P14	54
Figura 36 — Resultado das simulações para diferentes valores de h_c nos pontos P7 (a).....	55
Figura 37 — Gradiente térmico entre os pontos P7 e P14 para diferentes valores de h_c	56
Figura 38 — Dados de monitoramento da fundação de torre eólica (a) e da laje de reação (b)	57

Figura 39 — Seleção do tipo de análise	64
Figura 40 — Criação de materiais	65
Figura 41 — Inserção das propriedades dos materiais	65
Figura 42 — Fim da criação de materiais	66
Figura 43 — Criação de plano frontal	67
Figura 44 — Modo de desenho	67
Figura 45 — Desenho da meia seção transversal da fundação.....	68
Figura 46 — Revolução da seção da fundação.....	68
Figura 47 — Geração dos modelos da fundação e do solo	69
Figura 48 — Criação de componentes para os sólidos.....	69
Figura 49 — Criação de planos de referência	70
Figura 50 — Divisão da estrutura em sólidos menores.....	70
Figura 51 — Fundindo topologias para sólidos do mesmo componente	71
Figura 52 — Criação de Named Selections (NS).....	71
Figura 53 — União das faces comuns aos dois blocos da fundação	72
Figura 54 — Vinculação dos materiais aos sólidos	72
Figura 55 — Criação da malha de elementos finitos.....	73
Figura 56 — Malha de elementos finitos gerada.....	73
Figura 57 — Criação de Named Selection de um quarto da estrutura	74
Figura 58 — Deixando apenas um quarto da estrutura visível.....	74
Figura 59 — Criação de um NS de um elemento da malha	75
Figura 60 — Criação de NS para aplicação de contato com vento	75
Figura 61 — Definição da temperatura inicial	76
Figura 62 — Definição dos passos da simulação	76
Figura 63 — Criação do parâmetro de convecção com o ar	77
Figura 64 — Criação de condição de aquecimento da estrutura	77
Figura 65 — Inserção dos dados de geração de calor da estrutura.....	78
Figura 66 — Criação de visualização de resultados.....	78
Figura 67 — Iniciando a simulação.....	79
Figura 68 — Visualização dos dados e opção de exportação	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Limites de diferença de temperatura segundo o Departamento de Transportes de Iowa	23
Tabela 2 — Condutividade térmica para diversas areias	30
Tabela 3 — Propriedades térmicas do concreto e do solo	32
Tabela 4 — Parâmetros obtidos a partir das curvas de calorimetria	34
Tabela 5 — Casos de análise e valores de h_c	35
Tabela 6 — Tamanhos de malha testados no estudo de convergência	41
Tabela 7 — Temperaturas máximas atingidas nas simulações e seus momentos de ocorrência	47
Tabela 8 — Temperaturas máximas atingidas nas simulações e seus momentos de ocorrência	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.2 Problema de pesquisa e questões motivadoras	14
1.2.1 Problema de pesquisa	15
1.2.2 Questões motivadoras	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo geral	15
1.3.2 Objetivos específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Concreto massa	17
2.1.1 Aplicações	17
2.1.2 Efeito das propriedades térmicas no comportamento do concreto	18
2.1.2 Manifestações Patológicas	20
2.2 Hidratação do cimento	24
2.2.1 Química das reações de hidratação	24
2.2.2 Calorimetria do cimento	25
2.3 Modelagem em elementos finitos do problema térmico	27
2.3.1 Condições de contorno	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Materiais	31
3.2 Métodos	37
3.2.1 Simulações térmicas	37
3.2.2 Estudo de caso	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
6.1 Construção do modelo	41
4.2 Análises de temperaturas com diferentes calorimetrias	46
4.3 Análise das condições climáticas	52
4.4 Estudo de caso	56
5 CONCLUSÃO	59
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	60
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICE A — TUTORIAL DE SIMULAÇÃO TÉRMICA NO ANSYS	64

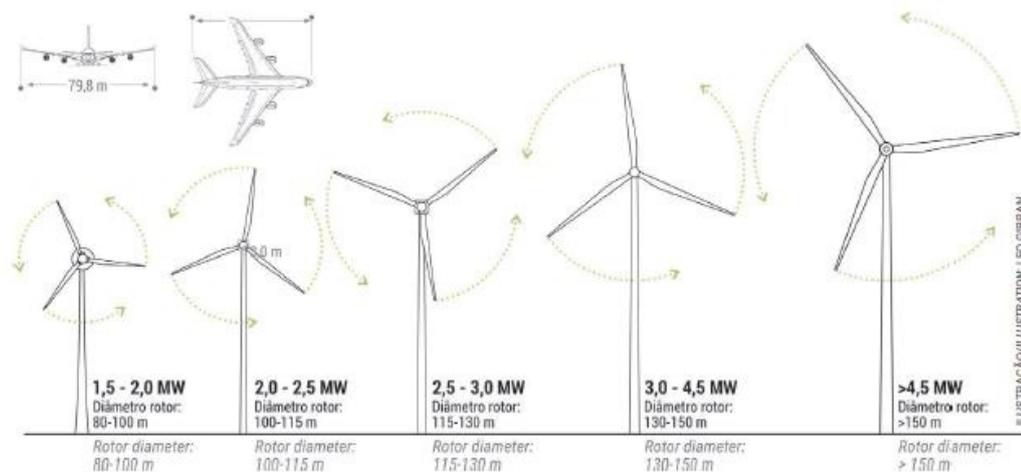
1 INTRODUÇÃO

A mudança da matriz energética mundial em busca de um modelo mais sustentável se reflete nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em especial o sete, que trata de fornecer energia sustentável e moderna à população mundial.

Nesse cenário, o Brasil se destaca pela sua aptidão às fontes renováveis, devido a sua extensa faixa litorânea e sua posição privilegiada no Equador, favorecendo a produção de energia a partir dos ventos e da luz solar. O Brasil passou de 15º em 2012 para 7º do mundo em 2020 na produção de energia eólica, de forma que ela já ocupa 10,8% da matriz energética brasileira, de modo que dos 726 parques instalados, 630 se encontram no Nordeste, com 92 no Ceará (ABEEÓLICA, 2021). Além disso, o potencial do estado se traduz em uma capacidade instalável de 94 GW (CEARÁ, 2019), frente aos 2385,1 MW instalados atualmente.

Com o aumento da produção e da tecnologia, as torres eólicas cresceram em altura e estão com pás com diâmetros cada vez maiores, para suprir a demanda de turbinas mais potentes, como apresentado na Figura 1. Todo esse crescimento se converte em mais carga que a estrutura transfere para a fundação, seja pelo acréscimo do peso próprio, seja pelas maiores cargas de vento de incidirão sobre a torre.

Figura 1 — Aumento das dimensões de torres eólicas e rotores



Fonte: CEARÁ, 2019.

Dados da ABEEólica (2021) também mostram que o país possui 8.585 aerogeradores instalados, que se converte na mesma quantidade de fundações necessárias para sustentar as torres, que além do elevado peso próprio, estão submetidos à ação horizontal e

variável dos ventos. Essas fundações volumosas apresentam um risco de ocorrência de manifestações patológicas devido à elevação de sua temperatura interna causada pela liberação de calor proveniente das reações de hidratação do cimento.

Faz-se necessário conhecer o comportamento térmico dessas estruturas, uma vez que o aquecimento excessivo nas primeiras idades pode provocar tais manifestações ao passar do tempo, quando as fundações estiverem em seu período de serviço, somado ao fato da dificuldade de acesso para inspeção visual e execução de reparos.

Deste modo, as duas opções para identificar o comportamento térmico dessas fundações são: monitoramento da temperatura na estrutura nas primeiras idades e previsão do comportamento por simulação computacional. As duas atividades devem se complementar, de forma que as simulações feitas antes da construção permitam uma estimativa confiável para a tomada de decisão dos processos construtivos e o monitoramento constata a previsão feita e melhora os modelos continuamente.

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio do Grupo de Pesquisa em Reologia de Materiais Cimentícios (ReoM), do Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Estruturas (GPMATE), fez parte do projeto de cooperação UFC/INSA-Rouen “Challenges with respect to aerogenerators` foundation in coastal zones”. Ainda, teve o apoio do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e contou com financiamento do Programa de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

1.2 Problema de pesquisa e questões motivadoras

Os modelos de simulação térmica para fundações de torres eólicas em concreto massa ainda não foram totalmente desenvolvidos, visto que a literatura não apresenta riqueza de dados em termos de monitoramento e simulação, com os trabalhos mais recentes tendo sido desenvolvidos pela própria UFC. Como o crescimento dos empreendimentos de energia eólica no país é recente, faz-se necessário penetrar nesse tema, uma vez que as manifestações patológicas que podem atacar estas estruturas são de difícil monitoramento e podem conduzir a risco humano e prejuízo econômico.

Estudos realizados em fundações volumosas para outras aplicações demonstram que já há um bom entendimento sobre como o centro das estruturas se comporta, uma vez que se trata de uma região onde a cinética de reações do cimento manda nas temperaturas

desenvolvidas. Porém, nas zonas periféricas, aumenta a influência do ambiente nos processos de troca de calor, e neste tópico existem diferentes abordagens sobre como modelar as condições de contorno, seja assumindo simplificações, seja tentando se aproximar ao máximo da realidade.

1.2.1 Problema de pesquisa

Ausência de um modelo de simulação térmica que permita boa compreensão dos efeitos das condições de contorno no comportamento da estrutura. Falta de critérios para prever as variabilidades entre os resultados de um modelo e medições de campo. Poucos estudos sobre a incidência de manifestações patológicas em fundações de torres eólicas.

1.2.2 Questões motivadoras

- a) As alterações no perfil de temperaturas simuladas de uma estrutura podem ser correlacionadas por modificações nos perfis calorimétricos usados como dados de entrada?
- b) Quais os efeitos das características climáticas típicas de zonas tropicais/litorâneas nas trocas de calor de fundações com o meio? Como estas podem ser observadas e estudadas em simulações e experimentos?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Investigar as trocas de calor que regem o comportamento térmico de fundações volumosas em concreto massa de maneira a contribuir para o aprimoramento de modelos de previsão de aquecimento dessas estruturas.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Investigar como diferentes perfis calorimétricos alteram a curva de temperatura desenvolvida nas fundações a partir de simulações;

- b) Avaliar o impacto das condições ambientais nas trocas de calor realizadas entre a estrutura e o seu entorno;
- c) Realizar um estudo de caso analisando estruturas submetidas a diferentes ambientes.

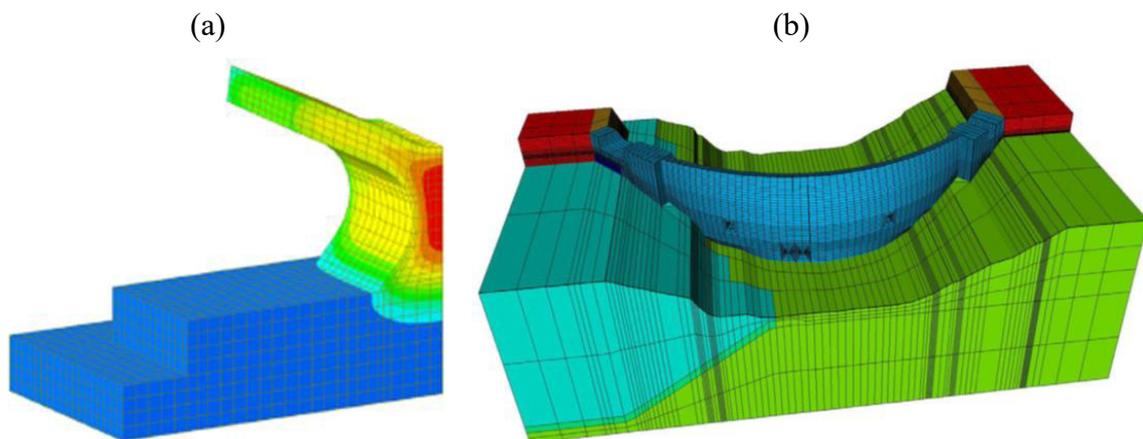
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto massa

2.1.1 Aplicações

De acordo com Mehta e Monteiro (2005), concreto massa é aquele envolvido em aplicações de estruturas volumosas, de forma que este necessita de cuidados especiais acerca da geração de calor e alteração de volume. Diversas estruturas se enquadram nessas especificações e já foram alvo de pesquisas, como barragens (CASTILHO *et al.*, 2018), pilares de pontes (HUANG *et al.*, 2018), blocos de fundação de prédios (TORRES; ANDRADE, 2016) e de torres eólicas (GONÇALVES, 2018), como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 — Exemplos de aplicações do concreto massa: pilares de pontes (a) e barragens (b)



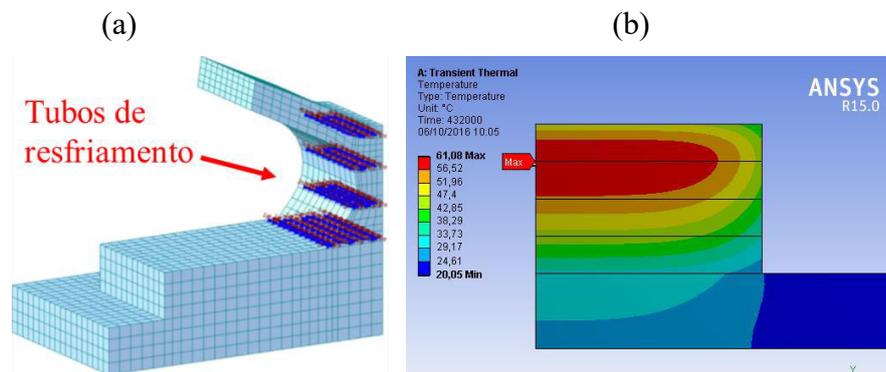
Fonte: Adaptado de Huang *et al.* (2018) e Castilho *et al.* (2018).

Os dados de monitoramento dessas estruturas mostram que as mesmas podem atingir temperaturas superiores a 80°C, o que será visto adiante como um patamar perigoso, pois propicia a ocorrência de manifestações patológicas. Dessa forma, medidas devem ser tomadas na etapa construtiva para controlar a elevação da temperatura. A redução da temperatura de lançamento do concreto é uma delas, e pode ser obtida por meio de resfriamento dos agregados ou da água, seja inserindo água gelada na mistura ou substituindo uma parte dela por gelo (CABRAL *et al.*, 2020).

Outra medida construtiva para limitar a máxima temperatura atingida na fundação, é realizar a concretagem em camadas, como analisado por Coelho (2012) utilizando simulação,

ao constatar que a temperatura máxima de um bloco caiu de 81,2°C para 61,7°C ao se aumentar o número de camadas de concretagem de uma para três. Também podem ser inseridos tubos de refrigeração durante a concretagem, por onde circula água, ajudando assim a dissipar o calor, como apresentado em Coelho (2016) e em Huang *et al.* (2018). Essas medidas são exemplificadas na Figura 3.

Figura 3 — Soluções para controle de temperaturas: tubos de resfriamento (a) e concretagem em camadas (b)



Fonte: Adaptado de Coelho (2016) e Huang *et al.* (2018).

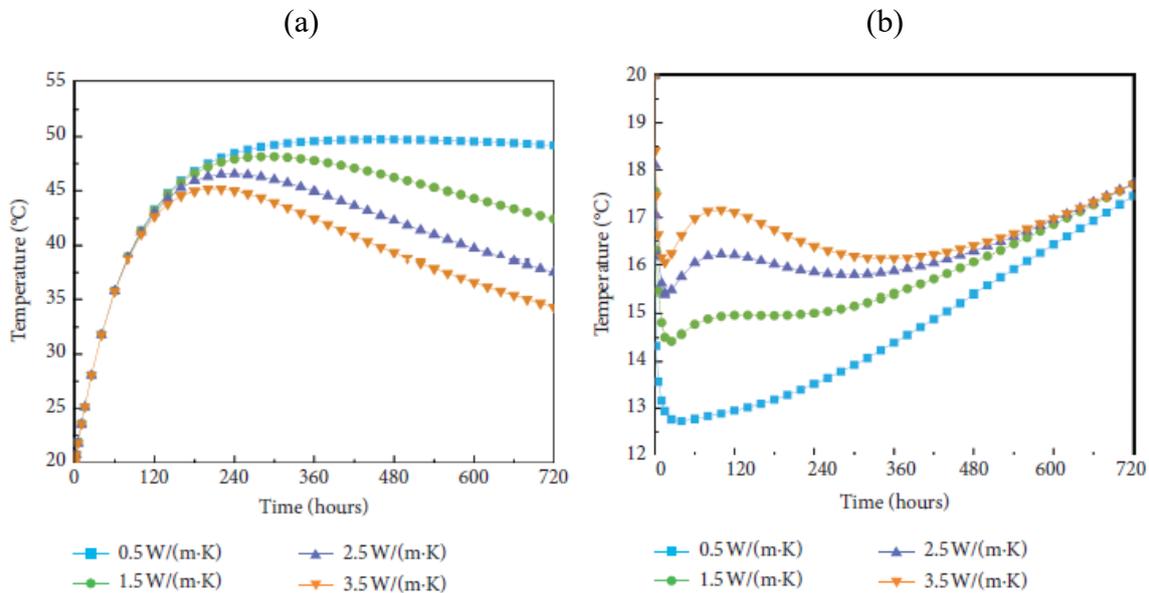
Já partindo para as propriedades do material, estas podem ser modificadas de forma a atingir patamares menores de temperaturas, seja pela mudança da cinética de hidratação do cimento com o uso de aditivos (SILER *et al.*, 2012), adições ou a substituição por um cimento com menor calor de hidratação (GONÇALVES, 2018), seja pela mudança das propriedades térmicas do concreto (ZHAO *et al.*, 2021), de modo que este seja mais eficiente em dispersar calor evitando também a formação de gradientes térmicos elevados entre o centro e as bordas da estrutura (ANISKIN e NGUYEN, 2020).

2.1.2 Efeito das propriedades térmicas no comportamento do concreto

Uma das condições que contribuem para o risco de fundações volumosas atingirem altas temperaturas é a sua baixa capacidade de dissipar o calor gerado na hidratação do cimento. Tal fato é consequência dos baixos valores dos parâmetros térmicos do concreto, como a condutividade térmica, quem em alguns estudos tem valores considerados entre 0,5 e 3,5 W/mK (ZHAO *et al.*, 2021) e entre 1,2 a 3,6 W/mK (DEHDEZI, 2014), a depender do tipo de agregado, enquanto valores típicos para metais são de 237 e 401 W/mK para o Alumínio e o Cobre a 27°C, respectivamente.

Em Zhao *et al.* (2021), essa variação da condutividade provocou diferenças da ordem de 15 °C no interior da estrutura modelada, quando comparadas as simulações com maior e menor valor, após 720 horas, vide Figura 4a. Nas condições de contorno, considerou-se um aumento linear da temperatura ambiente ao longo da simulação, provocando um fenômeno diferente na borda da estrutura. Nesta, o aumento da condutividade fez as temperaturas aumentarem mais rápido em conformidade com o aumento da temperatura ambiente, como observado na Figura 4b.

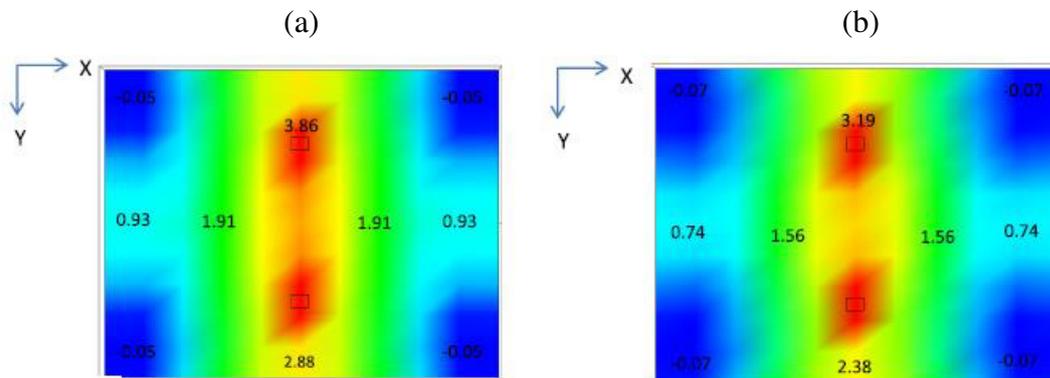
Figura 4 — Efeito do aumento da condutividade térmica na temperatura no centro (a) e na borda (b) da estrutura



Fonte: Zhao *et al.*, 2021.

Já em Dehdezi (2014), os menores valores de condutividade apresentaram maior diferença de temperatura, uma vez que para pavimentos de concreto a principal fonte de calor é a radiação solar, gerando diferenças entre o topo e a base da camada de concreto. A Figura 5 mostra uma comparação entre simulações da mesma peça de concreto, e observa-se uma redução das tensões de origem térmica quando houve o aumento da condutividade de 0,5 W/m.°C (a) para 1,2 W/m.°C.

Figura 5 — Distribuição de tensões para valores de 0,5 (a) e 1,2 (b) W/m.°C de condutividade térmica



Fonte: Dehdezi, 2014.

Enquanto a condutividade mede a capacidade do concreto dissipar calor, a difusividade representa a velocidade que essas movimentações acontecem, apresentando unidade em função do tempo. Por ser uma grandeza obtida matematicamente pelo inverso da condutividade, existem menos estudos que têm a difusividade térmica como enfoque, destacando Taoukil *et al.* (2013), que avaliou tanto condutividade quanto difusividade térmica para concretos com diferentes teores de umidade, encontrando resultados da ordem de 10^{-7} m²/s para difusividade.

Por último, o calor específico, que é conhecido como valor necessário para elevar uma grama de um material em 1°C, no concreto possui valores típicos entre 0,9 e 1,0 kJ/kg/°C (MEHTA e MONTEIRO, 2005). Em seu trabalho, Zhao *et al.* (2021) encontraram variações de temperaturas de estruturas modeladas da ordem de 5°C quando variou a capacidade térmica de 0,8 a 1,1 kJ/kg/°C. Já em Jeong *et al.* (2021) o cálculo do calor específico é parte de um modelo matemático de previsão do aquecimento do concreto, e seu valor é composto dos calores específicos dos componentes individuais do concreto, como apresentado na Equação 1 abaixo.

$$C_c = \frac{C_p \cdot (A+C) + A_m \cdot C_m + A_g \cdot C_g}{A+C+A_m+A_g} \quad (1)$$

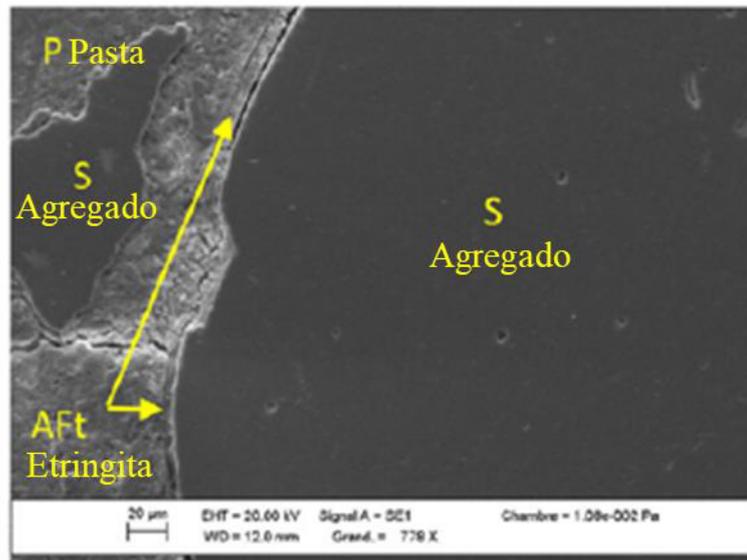
2.1.2 Manifestações Patológicas

Existem duas principais manifestações patológicas decorrentes dos efeitos da temperatura: a formação de etringita tardia e as fissuras térmicas. A etringita é um gel expansivo com cristais em forma de agulha ou aciculares que se forma normalmente no início das reações

de hidratação do cimento. Esta é chamada de etringita primária, oriunda da reação do sulfato de cálcio da gipsita com os aluminatos tricálcicos do clínquer. Porém, quando a massa de concreto atinge temperaturas da ordem de 65°C, a etringita se decompõe em monossulfato hidratado, voltando a se formar meses ou anos após a concretagem. Nesse cenário, quando é chamada de tardia, ela se acumula na interface entre pasta e agregado graúdo, como apresentado na Figura 6, e provoca fissuras por expansão (IFSTTAR, 2018).

Figura 6 — Formação de etringita tardia na interface entre agregado e pasta (a) e aspecto do concreto fissurado (b)

(a)



(b)

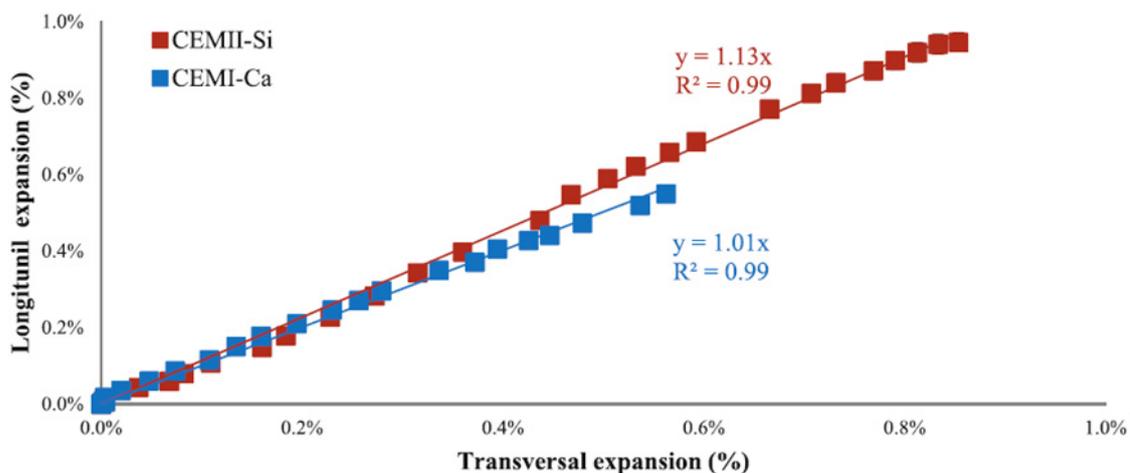


Fonte: Leklou *et al.* (2016) e Thiebaut *et al.*, 2018.

Estudos como os de Thiebaut *et al.* (2018) e Leklou *et al.* (2016) submeteram, respectivamente, amostras de concreto e argamassa a tratamentos térmicos para atingir temperaturas da ordem de 80°C, acelerando a formação de etringita tardia, para avaliar a expansão dos corpos de prova ao longo de 1 e 2 anos. No primeiro, foram testadas diferentes restrições à expansão, observando-se que em casos sem restrições, a expansão por etringita tardia ocorre de maneira isotrópica, enquanto no segundo foram ensaiados traços com substituição de cimento por cinza volante, de modo que teores de 20 e 30% de cinza volante conseguiram neutralizar o aumento de volume das amostras.

Pichelin *et al.* (2020) também estudaram a formação de etringita tardia por de modo acelerado, submetendo amostras de concreto a ciclos de aquecimento, chegando a 80°C. Aqui, o objetivo foi verificar que propriedades do concreto mudavam antes que a expansão por etringita se iniciasse, pois a aplicação em vista do material é em estruturas de concreto de usinas nucleares. Neste estudo também foi percebida a expansão isotrópica do material quando em condições livres de restrições, como verificado na Figura 7, e as três propriedades que mudaram antes do início da expansão foram permeabilidade à gases, resistividade elétrica e módulo estático.

Figura 7 — Deformação provocada por etringita tardia nas direções transversal e longitudinal de amostras de concreto



Fonte: Pichelin *et al.*, 2020.

Já as fissuras térmicas ocorrem devido à diferença de velocidade de resfriamento das zonas periféricas do concreto em relação ao seu centro, que produz tensões internas, levando o concreto a fissurar. Sargam *et al.* (2019) utilizaram como critério para avaliar a fissuração térmica valores propostos pelo Departamento de Transportes de Iowa, que estão apresentados

na Tabela 1. Aniskin e Nguyen (2020) utilizaram um critério de diferença máxima de temperatura entre o centro e a borda de um bloco de fundação de 20°C para atestar risco de fissuração, enquanto Zhao *et al.*, (2021), admitiram uma diferença de até 25°C.

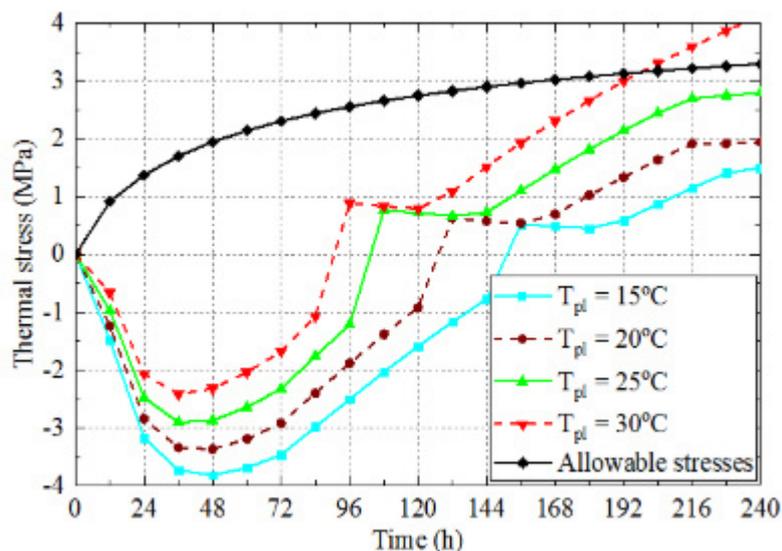
Tabela 1 — Limites de diferença de temperatura segundo o Departamento de Transportes de Iowa

Tempo (h)	Máxima diferença de temperaturas (°C)
0-24	11
24-48	17
48-72	22
>72	28

Fonte: Sargam *et al.* (2019)

Outros trabalhos, como Bui e Nguyen (2020) e Huang *et al.* (2018) acrescentaram análises mecânicas às térmicas, comparando a formação de tensões internas à evolução da resistência à tração do concreto. Em Bui e Nguyen (2020), a resistência (curva preta) é plotada junto das tensões térmicas que se desenvolvem no modelo, e como pode ser observado na Figura 8, apenas a simulação com a temperatura de lançamento de 30°C (curva vermelha) superou as tensões admissíveis, atestando risco de fissuração térmica.

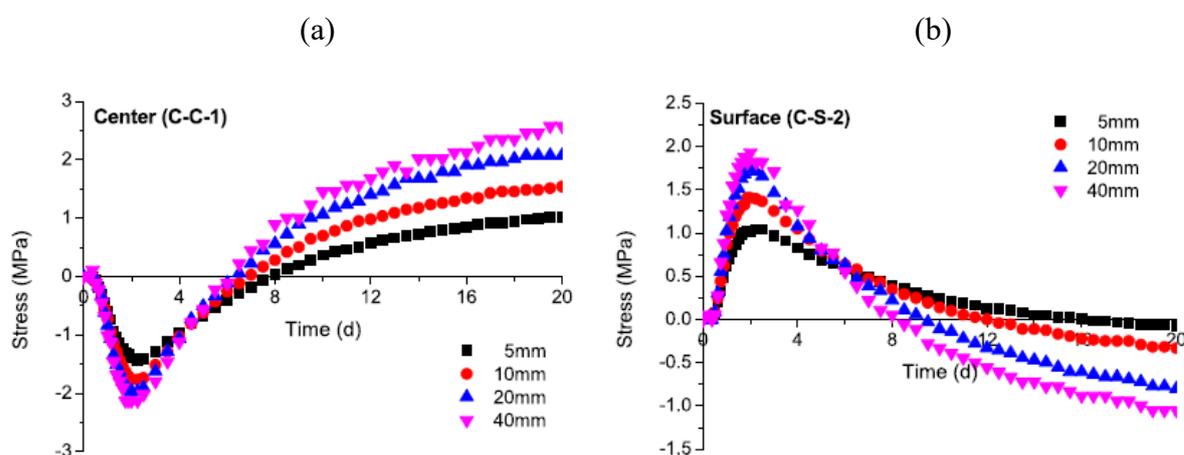
Figura 8 — Tensões de origem térmica (“*Thermal stress*”) geradas por gradiente térmico e tensões de tração admissíveis (“*Allowable stresses*”) ao longo do tempo (“*Time*”) após a concretagem



Fonte: Bui e Nguyen (2020).

As tensões de origem térmica também são influenciadas pela restrição ao deslocamento provocada pelo endurecimento do concreto e pelos contatos da estrutura, de forma que a diferença na velocidade de endurecimento entre o centro e a superfície da mesma altera o comportamento das tensões. Tal comportamento é estudado por Cha et al. (2020), que mediram as tensões geradas em amostras de concreto, alterando a espessura das placas de restrição, como apresentado na Figura 9. Foi observado que o aumento da espessura das placas, ou seja, uma maior restrição ao deslocamento, provocou valores mais extremos de tensões tanto de tração quanto de compressão.

Figura 9 — Tensões térmicas no centro (a) e superfície (b) de amostras de concreto com diferentes espessuras de placas de restrição



Fonte: Cha *et al.*, 2020.

2.2 Hidratação do cimento

2.2.1 Química das reações de hidratação

As reações que governam a hidratação do cimento são exotérmicas e, devido à complexidade na composição do ligante, diversos processos acontecem simultaneamente e, para cada fase, determinados compostos são predominantes na cinética das reações.

Os fatores que influenciam a quantidade de calor liberada pelo cimento são a composição mineral do clínquer, devido à porcentagem de cada componente reativo; o tipo e quantidade de adições, sendo estas pozolânicas ou não; a superfície específica e tamanho das partículas, pois interfere na reatividade do composto (como o cimento CP V, que é altamente reativo por possuir superfície específica superior aos outros tipos); a relação água cimento, pois

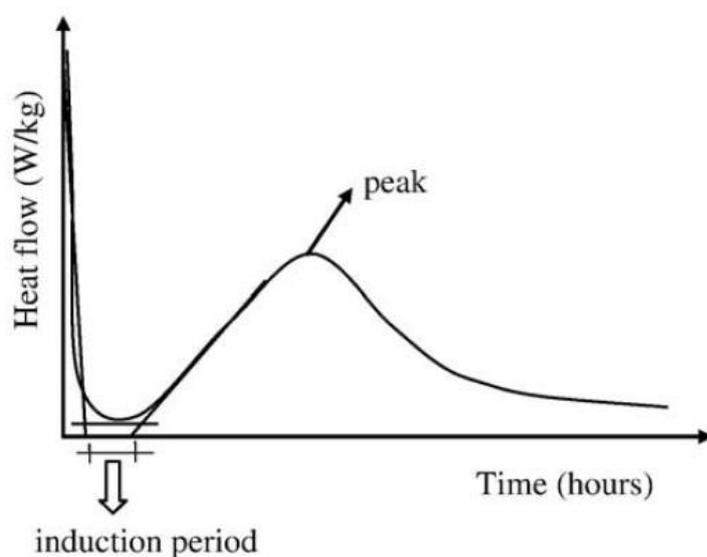
é necessária uma quantidade mínima para que todas as partículas possam reagir, além do seu excesso causar uma desaceleração da reação nas primeiras horas por provocar uma supersaturação; e a temperatura, por esta atuar como fator anabolizante das reações (LACARRIÈRE *et al.*, 2019).

Sellier e Multon (2018) elaboraram um modelo químico para prever a formação de etringita, selecionando diferentes reações para representar cada etapa da hidratação do cimento, com foco nas que produzem etringita: inicialmente, dissolução dos aluminatos e formação de etringita ou monossulfato, a depender da temperatura; em seguida, liberação de energia pelos aluminatos e, por fim, conversão de aluminatos em sulfatos e etringita tardia. O modelo foi aplicado numa análise mecânica de viga e permitiu identificar o gradiente de expansão da estrutura e as regiões de fissuração pelo ataque da etringita tardia.

2.2.2 Calorimetria do cimento

A calorimetria do cimento é o ensaio que gera o perfil que mostra a liberação de calor de uma amostra ao longo do tempo, como exemplificado pela Figura 10. A partir dela, podem-se identificar as etapas de hidratação do cimento: período de iniciação, onde os aluminatos de cálcio se dissolvem e liberam calor muito rapidamente, um período de indução com poucas reações, seguido de etapas de aceleração e desaceleração, nas quais os cristais de silicato de cálcio hidratado se formam. A Figura 10 exemplifica o tipo de perfil resultante desses ensaios, com as etapas da hidratação identificadas.

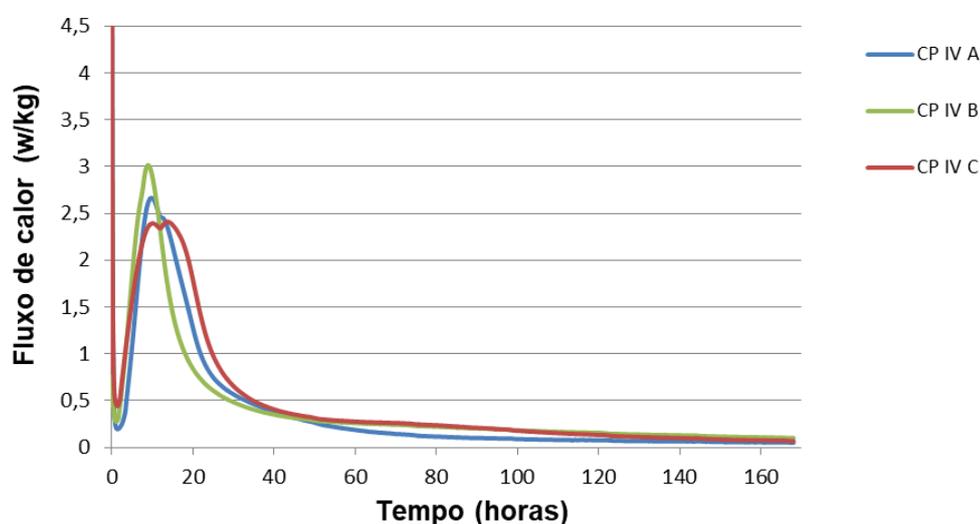
Figura 10 — Perfil calorimétrico do cimento



Fonte: Betioli *et al.*, 2009.

Além de ser um dado de entrada obrigatório nas análises térmicas, os resultados do ensaio de calorimetria apresentam alta sensibilidade a variações na constituição do cimento, como se observa na Figura 11, constituindo uma versátil ferramenta de caracterização. Gonçalves (2018) realizou calorimetrias em cimentos de diferentes tipos, fabricantes e utilizando diferentes teores de substituição de cinza volante, de modo que os melhores resultados térmicos e mecânicos foram obtidos por uma pasta de cimento CP-V com substituição de 20% de cinza volante.

Figura 11 — Perfis calorimétricos para cimentos CP-IV de diferentes fabricantes



Fonte: Gonçalves, 2018.

Jeong *et al.* (2021) elaboraram um modelo de previsão da elevação adiabática temperatura de concretos utilizando ensaios de calorimetria isotérmica para avaliar o risco de ocorrência de altas temperaturas. Foram realizados ensaios em pastas com diferentes relações água/cimento e a diferentes temperaturas, de modo que o modelo apresentou valores próximos aos obtidos pelo ensaio de elevação adiabática, observando-se que a variação da relação a/c não apresentou diferenças significativas, uma vez que os teores testados (0,4 a 0,5) são suficientes para hidratar todo o conteúdo de cimento.

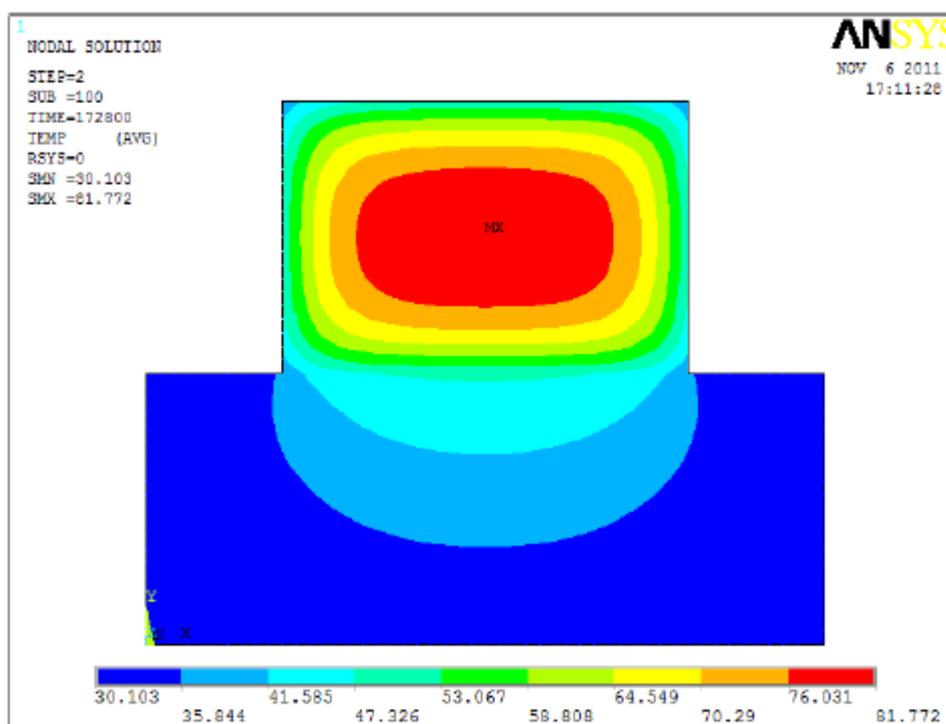
Diversos estudos utilizam a calorimetria como ferramenta para prever o grau de hidratação do cimento, como Betioli *et al.* (2009) e Jeong *et al.* (2021). Além disso, vários parâmetros podem ser modificados para alterar essas curvas, como: substituição do cimento por adições minerais (AMINE *et al.*, 2017; GONÇALVES, 2018), aditivos químicos (SILER *et al.*, 2012), temperatura de ensaio (JEONG *et al.*, 2021).

2.3 Modelagem em elementos finitos do problema térmico

As soluções de modelagem em elementos finitos são amplamente utilizadas pela sua capacidade de resolver uma grande quantidade de problemas de valores de contorno e pela versatilidade de suas soluções (diferentes geometrias, condições de contorno etc.). Para a problemática das análises térmicas, é possível visualizar os campos de temperaturas desenvolvidos na estrutura ao longo do tempo, tanto em duas (Figura 12) quanto em três dimensões (Figura 13), além do cálculo das tensões desenvolvidas pelo efeito térmico, quando esta passa a ser uma modelagem termomecânica, como apresentado em Huang *et al.* (2018) e Cifuentes *et al.* (2017).

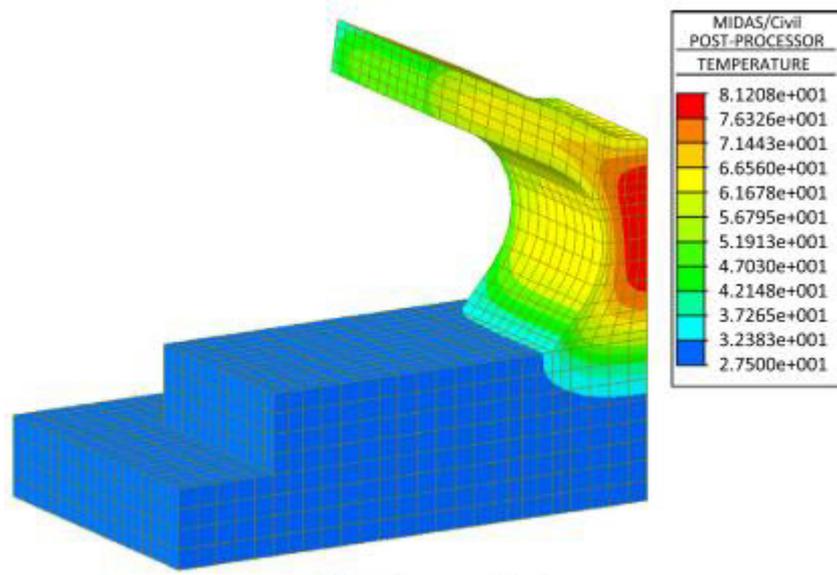
Estes dois trabalhos apresentam semelhanças na metodologia, apesar das diferenças no enfoque prático: o primeiro trata de pilares de pontes, enquanto o segundo usa um muro de contenção como estrutura teste (Figura 14). Inicialmente é realizada a construção de modelos físicos, que são aparelhados com termopares e fornecem dados reais para comparação. Em seguida, os modelos térmicos são executados e comparados com os dados de campo, para checar a qualidade dos resultados, para que por fim, possam ser estimadas as tensões a partir dos dados de temperatura.

Figura 12 — Resultado de simulação térmica em modelo bidimensional



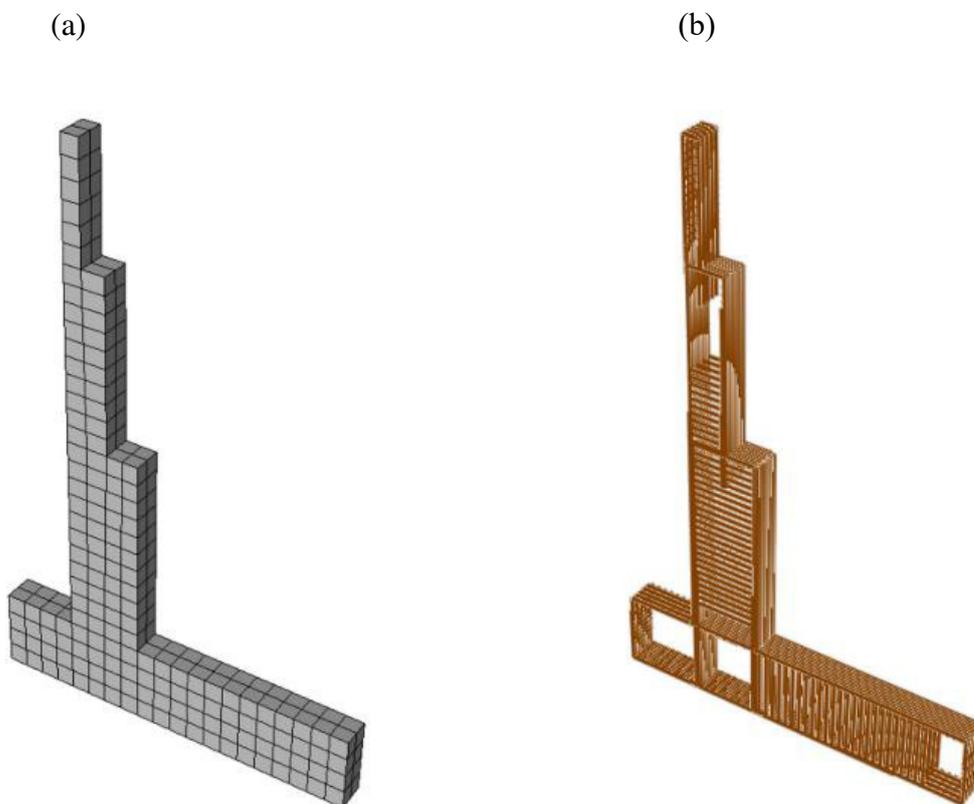
Fonte: Coelho, 2012.

Figura 13 — Resultado de simulação térmica em modelo tridimensional



Fonte: Huang *et al.*, 2018.

Figura 14 — Modelo de elementos finitos de concreto (a) e armadura (b) de muro de contenção



Fonte: Cifuentes *et al.* (2017)

Existe uma gama de *softwares* que permitem executar as análises térmicas, e eles podem ser agrupados em dois grupos: aqueles que são de elementos finitos puros e, dessa forma, permitem uma alteração mais profunda de parâmetros como tamanho do elemento, condições de contorno, característica de aquecimento do material, etc. Entre esses podem ser citados Abaqus (CIFUENTES *et al.*, 2019), Ansys (COELHO *et al.*, 2016), Comsol, DIANA (LIM *et al.*, 2016), MIDAS (HUANG *et al.*, 2018).

Por outro lado, existem softwares que também utilizam soluções em elementos finitos, mas cujo foco é voltado para atuação no mercado, possuindo assim simplificações nos parâmetros de entrada e engessamento quanto às condições de contorno e diferentes cenários que podem ser analisados, como por exemplo, efeito de variações da temperatura ambiente e da irradiação solar ao longo do dia. Neste grupo, encontramos softwares como o b4cast (CABRAL *et al.*, 2020) e o *Concreteworks* (TAHERSIMA; TIKALSKY, 2017).

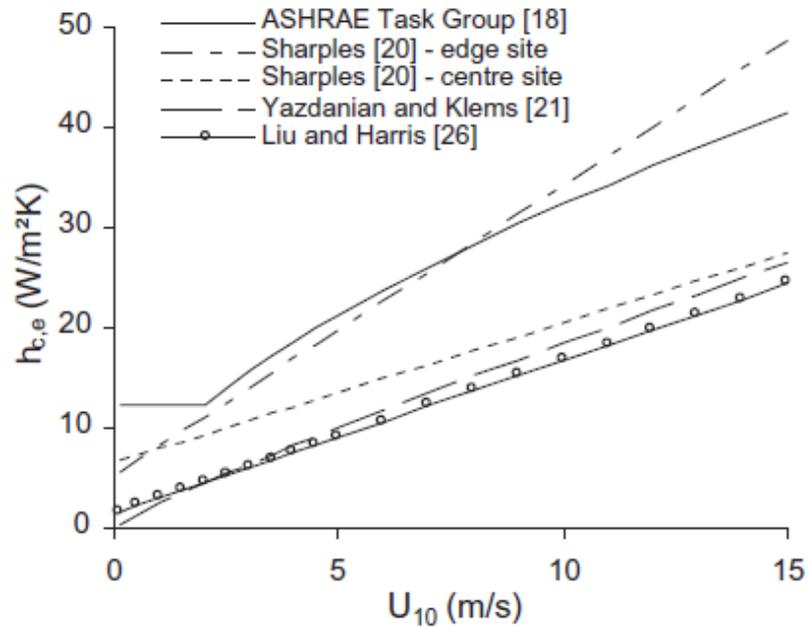
2.3.1 Condições de contorno

Durante a construção do modelo para simulação térmica, é necessário incluir as condições do ambiente na qual a estrutura está inserida para que a modelagem se aproxime da realidade, visto que a fundação realiza trocas de calor com o meio. As trocas realizadas por convecção são definidas pela Equação 2:

$$Q = h_c A (T - T_\infty) \quad (2)$$

Onde h_c é o coeficiente de troca de calor convectiva. Defraeye *et al.* (2011) realizaram análises com modelagem fluido dinâmica computacional (CFD) para estabelecer relações entre esse coeficiente e a velocidade do vento, além de, em sua revisão, apresentarem relações empíricas feitas por outros autores, como apresentado na Figura 15.

Já para as trocas de calor com o solo, que se dão por condução, é necessário conhecer o valor de condutividade térmica do mesmo. Yan *et al.* (2019) elaboraram um modelo de previsão generalizado para diferentes tipos de solo, comparando com resultados empíricos de outros trabalhos, com amostras de China, Canadá e Japão. Já Alrtimi *et al.* (2016) analisaram apenas solo arenoso, mas propuseram um método de previsão e compararam com resultados de ensaios, avaliando porosidade e grau de saturação para esta areia. Zhang e Wang (2017) fizeram uma revisão de modelos de previsão de condutividade térmica do solo, avaliando o desempenho dos modelos por meio de análises de regressão linear e de raiz quadrada média do erro, tendo valores para amostras apresentadas na Tabela 2.

Figura 15 — Relações empíricas entre h_c e velocidade do vento

Fonte: Defraeye *et al.* (2011)

Tabela 2 — Condutividade térmica para diversas areias

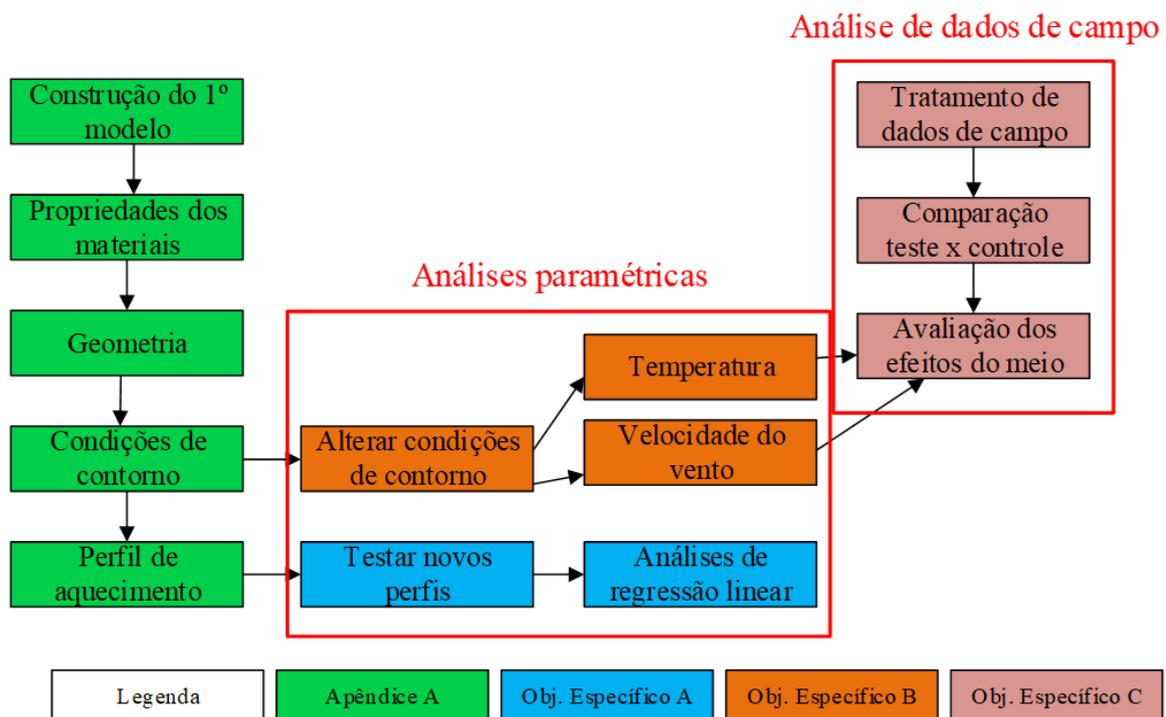
Autor	Tipo de solo	Condutividade térmica (W/m.K)
De Vries (1963)	Areias de quartzo	6,64
	Areias de Fairbanks	4,43
Gangadhara Rao e Singh (1999)	Areias finas	7,60
	Areias grossas	7,60
Lu e Ren (2009)	Areia 1	5,50
	Areia 2	4,08
	Areia 12	6,90
Lu et al. (2013)	Areias	7,10
Choo et al. (2012)	Areias de quartzo	7,60
Zhang et al. (2015)	Areias de quartzo	7,60

Fonte: adaptado de Zhang e Wang (2019)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A sequência metodológica associada à realização deste projeto é apresentada pelo fluxograma da Figura 16, de forma que etapas necessárias à conclusão de cada objetivo específico possuem a mesma cor.

Figura 16 — Fluxograma de etapas metodológicas

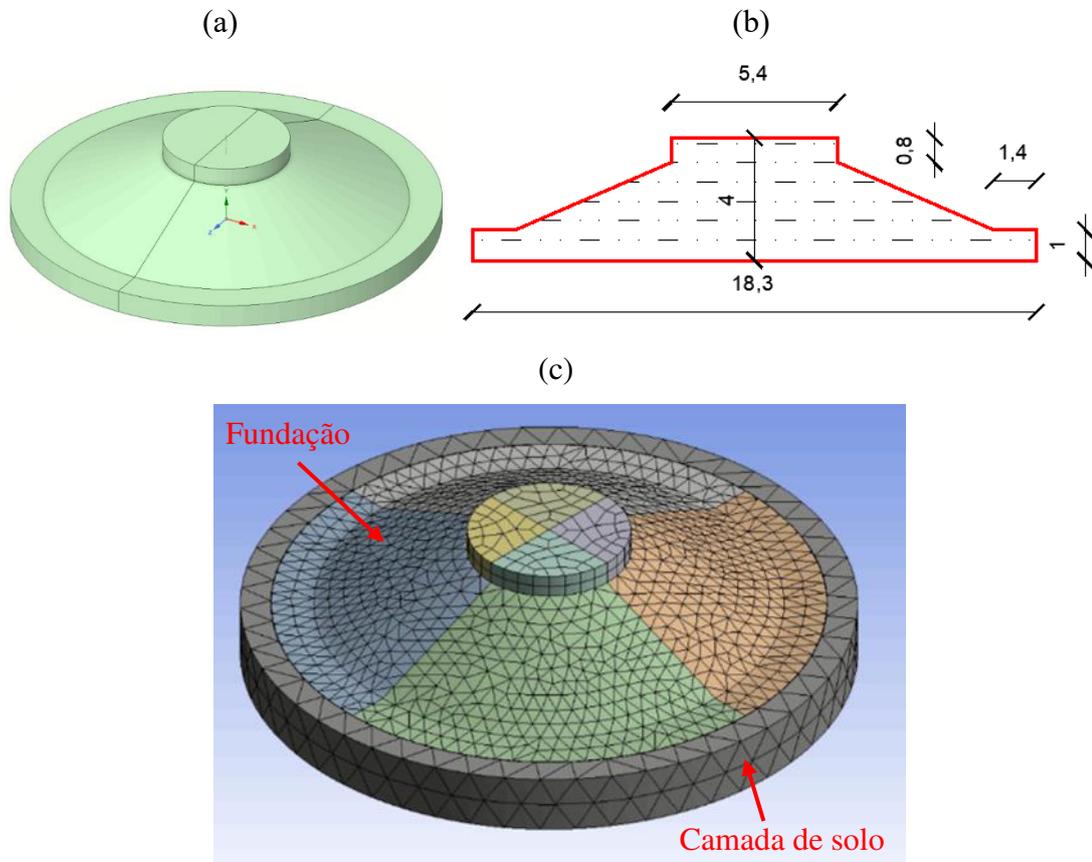


Fonte: o Autor.

3.1 Materiais

Para a construção de um modelo de fundação de torre eólica para proceder com as simulações térmicas, priorizou-se utilizar informações de modo a aproximar ao máximo o modelo da realidade. A geometria da estrutura, apresentada na Figura 17, é a mesma de fundações reais de parques construídos no Nordeste, e foi disponibilizada por uma construtora parceira do projeto de pesquisa. Além da fundação, foi modelada uma camada de solo em contato com a estrutura nas faces inferiores e laterais da mesma, possuindo uma espessura de 1 m em ambas as direções, por onde a fundação pode trocar calor por condução.

Figura 17 — Geometria (a), dimensões da fundação em metros (b) e camada de solo (c) em contato com a estrutura.



Fonte: o Autor.

Para análises do tipo transiente térmico, o Ansys solicita três propriedades dos materiais: massa específica, condutividade térmica e calor específico. Como não foi possível obter os dados reais sobre o concreto utilizado nas fundações, foram escolhidos valores típicos da literatura para estas propriedades. Assim como o solo, para o qual foram escolhidos valores típicos de solos arenosos, dado que as torres eólicas se concentram em zonas litorâneas. Os valores utilizados estão apresentados na Tabela 3 abaixo.

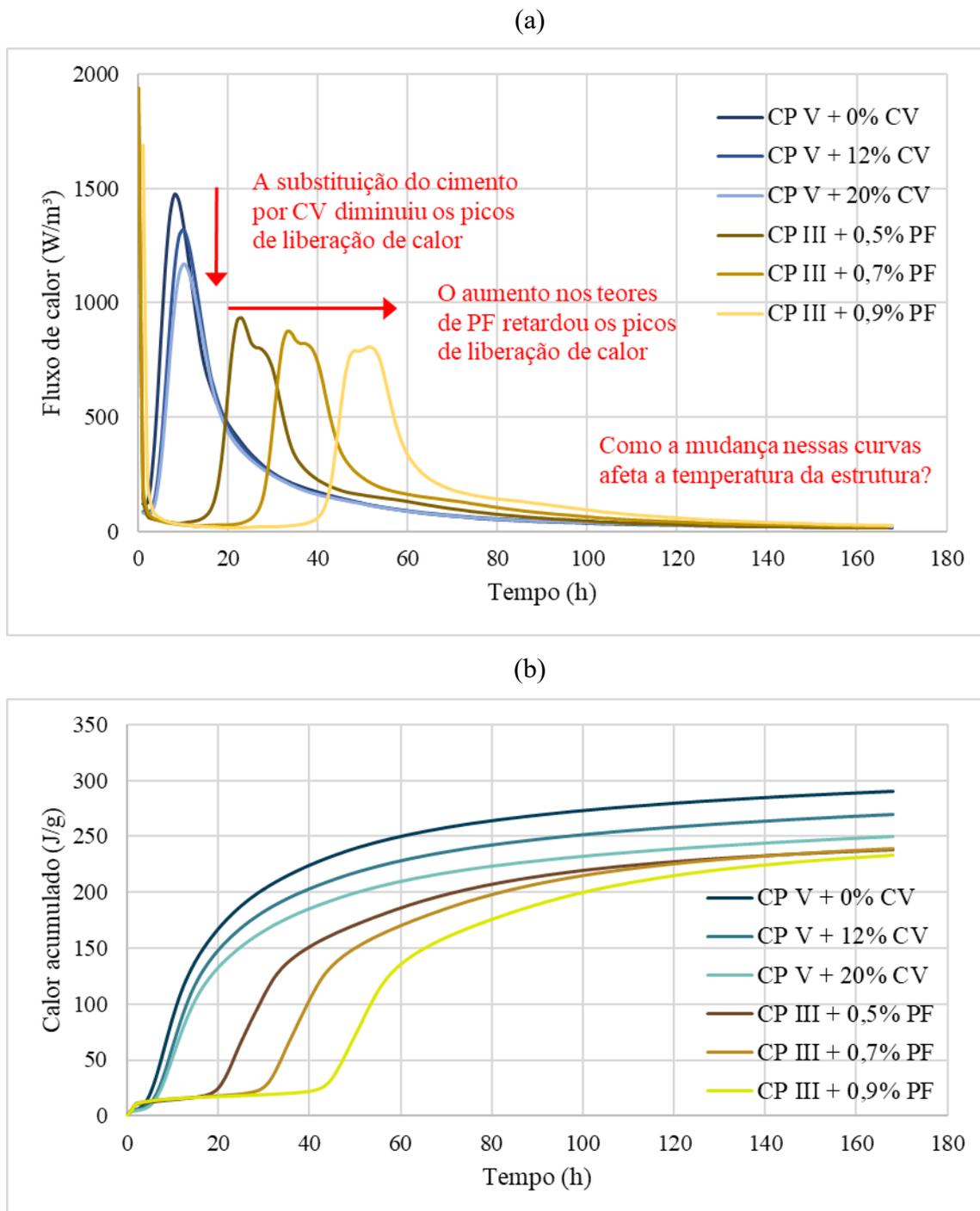
Tabela 3 — Propriedades térmicas do concreto e do solo

Propriedades	Concreto	Solo arenoso
Massa específica (kg/m ³)	2400	-
Massa específica aparente (kg/m ³)	-	1500
Condutividade térmica (W/m.°C)	2,675	2
Calor específico (J/kg.°C)	962	840

Fonte: o Autor.

Para avaliar os efeitos de diferentes curvas de liberação de calor no comportamento térmico da estrutura, foram utilizados dados de ensaios de calorimetria isotérmica realizados na UFC em outras pesquisas e trabalhos técnicos. A Figura 18 apresenta resultados de amostras de CP V com substituição de cinza volante, utilizados por Gonçalves (2018), e de CP III com aditivo polifuncional.

Figura 18 — Perfis de liberação de calor ao longo do tempo (a) e de calor acumulado (b)



As curvas de geração de calor ao longo do tempo foram utilizadas diretamente no Ansys, dessa forma, o fluxo de calor está apresentado em W/m^3 , de forma que os valores obtidos do ensaio foram multiplicados por $350 \text{ kg}/m^3$, valor típico de consumo de cimentos por metro cúbico de concreto, uma vez que não foi possível obter os consumos utilizados nos concretos das fundações reais. Já as curvas de calor acumulado estão apenas normalizadas pela massa de cimento das amostras da calorimetria, então estão apresentadas em J/g .

A partir desses gráficos, foram extraídos parâmetros de calorimetria que foram utilizados posteriormente nas análises de regressão linear com os resultados das simulações. Essas variáveis estão apresentadas na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 — Parâmetros obtidos a partir das curvas de calorimetria

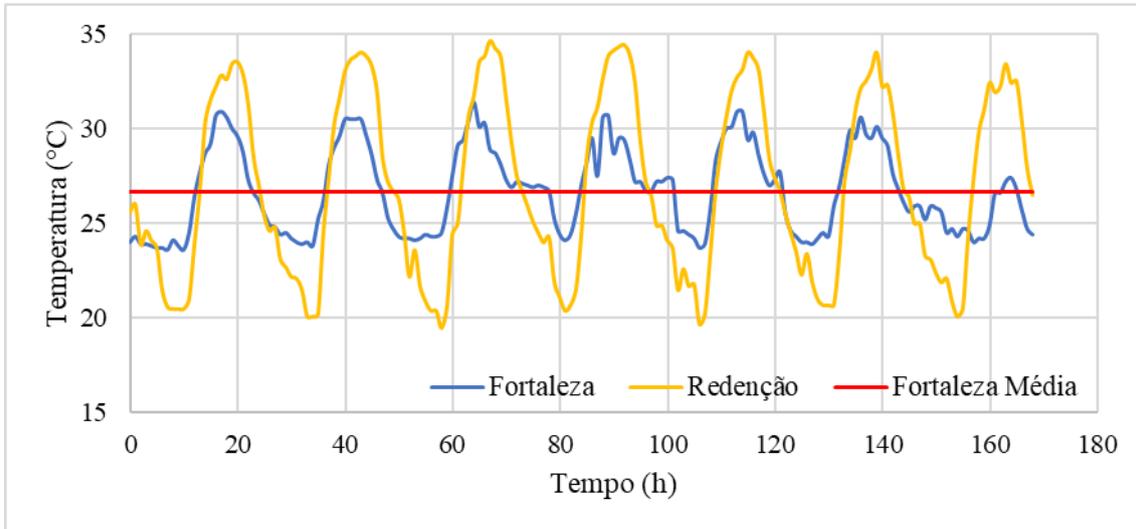
Amostra	Período de indução (h)	Pico de liberação de calor ($W/kg/m^3$)	Horário do pico (h)	Calor liberado após 168 h (J/g)
CP V + 0% CV	-	1473,076	8	290,268
CP V + 12% CV	-	1321,343	10	269,496
CP V + 20% CV	-	1168,762	10	250,401
CP III + 0,5% PF	16	932,814	24	238,203
CP III + 0,7% PF	26	872,409	34	239,400
CP III + 0,9% PF	37	804,851	51	233,098

Fonte: o Autor.

Os dados utilizados para caracterizar o clima foram de temperatura ambiente e velocidade do vento, obtidos no portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), de forma que diferentes amplitudes térmicas puderam ser avaliadas, considerando o período da primeira semana de julho.

As cidades escolhidas foram Fortaleza e Redenção, que apresentaram amplitudes médias de $6,5$ e $13,8^\circ C$, respectivamente. Essa escolha se deu pelo fato do clima de Fortaleza representar valores típicos de uma cidade litorânea do Nordeste, enquanto Redenção ilustra um caso que possibilita a avaliação do efeito de maiores variações. Os dados estão apresentados na Figura 19, além da temperatura média para Fortaleza no mesmo período.

Figura 19 — Temperaturas ao longo do tempo



Fonte: o Autor.

A velocidade do vento foi considerada de maneira simplificada, de modo que foram utilizados dados de Fortaleza, apresentados na Figura 20, durante o mesmo período das temperaturas. Foram calculados o valor médio e o desvio padrão para esse período, gerando assim três casos para análise: um valor de velocidade média, a média acrescida e decrescida do desvio padrão. Tais valores foram aplicados na fórmula de Defraeye *et al.* (2011), apresentada na Equação 3, que converte a velocidade do vento (V) no coeficiente de trocas de calor convectivas, h_c , e seus valores estão apresentados na Tabela 5.

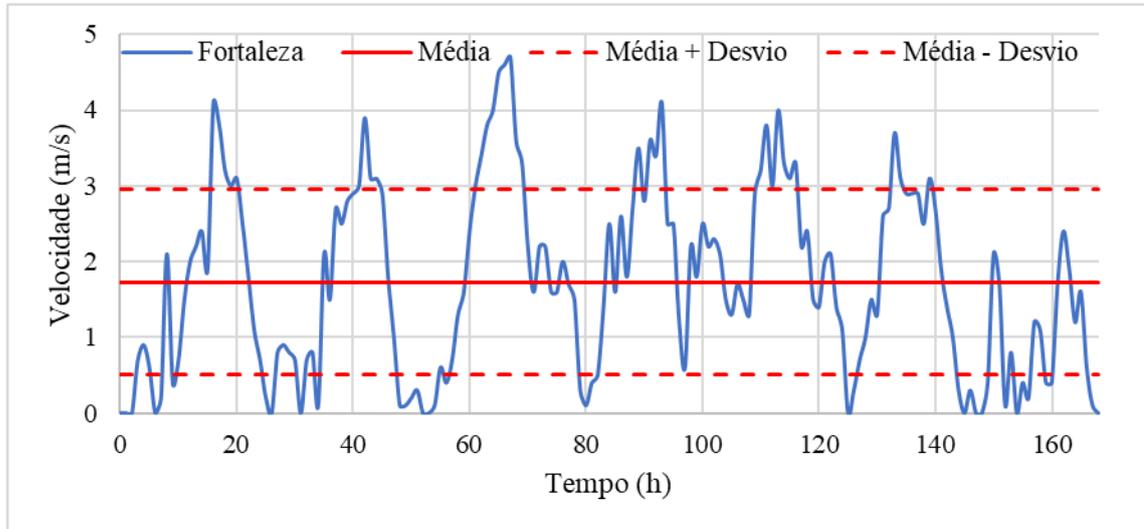
$$h_c = 5,01 \times V^{0,85} \quad (3)$$

Tabela 5 — Casos de análise e valores de h_c

Caso	Vel. Média (m/s)	h_c (W/m².°C)
Média - desvio	0,50	2,79
Média	1,73	7,99
Média + desvio	2,96	12,61

Fonte: o Autor

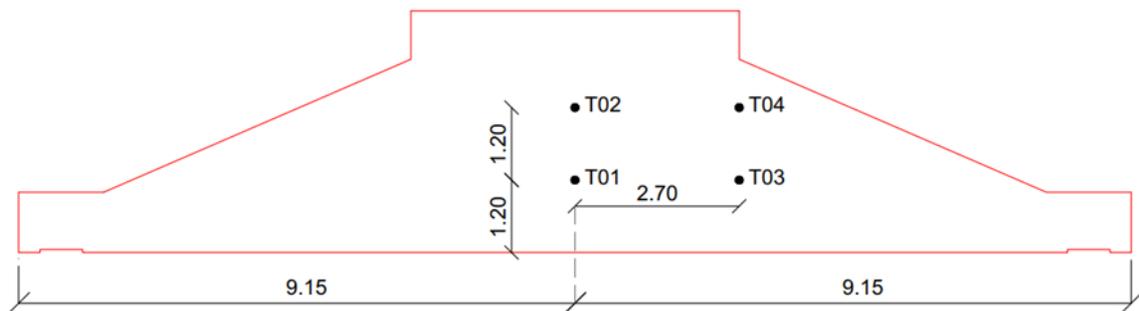
Figura 20 — Velocidade do vento em Fortaleza



Fonte: o Autor.

Já para o estudo de caso de fundações reais, foram recebidos dados de fundações de torres eólicas de um parque concretado no Nordeste, e estas foram as estruturas teste consideradas na análise. O monitoramento foi realizado pelo período de uma semana, e cada estrutura foi instrumentada com quatro termopares tipo K, seguindo o esquema apresentado na Figura 21.

Figura 21 — Esquema de posicionamento dos termopares

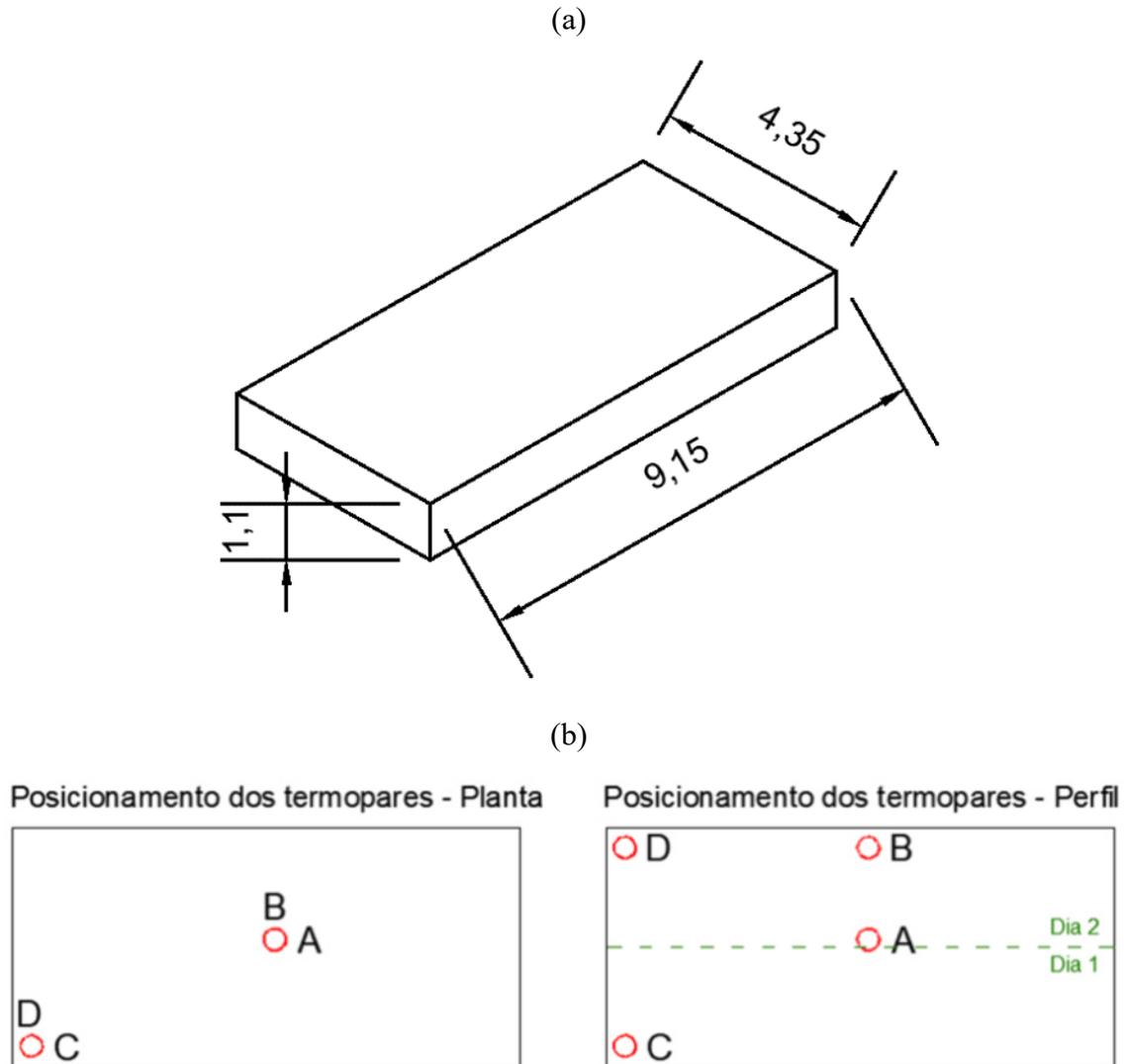


Fonte: Babadopulos *et al.*, 2021.

A estrutura controle, cujo acompanhamento da concretagem e instrumentação foi realizada pelo Autor e outros pesquisadores do ReoM, trata-se da laje de reação do Laboratório de Estruturas em construção no Campus do Pici da UFC, e suas dimensões e o posicionamento dos termopares são mostrados na Figura 22. A concretagem durou dois dias, e também foram

utilizados termopares tipo K, com dados sendo gravados a cada hora durante o período de uma semana.

Figura 22 — Dimensões da laje de reação, em metros (a) e esquema de posicionamento dos termopares (b)



Fonte: o Autor.

3.2 Métodos

3.2.1 Simulações térmicas

A criação do modelo térmico de fundação de concreto foi feita no software de elementos finitos Ansys 2021 R1, versão estudantil. O modelo térmico adotado resolve, para o interior da estrutura, a equação diferencial da condução de calor acrescida de uma fonte de geração de calor, apresentada na Equação 4 (Ho *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2018):

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_h = \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Onde k é a condutividade térmica ($\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$), Q_h é a geração de calor interna ($\text{J/m}^3\cdot\text{h}$), ρ é a densidade do concreto (k/m^3), C_p é o calor específico ($\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}$), T é a temperatura ($^\circ\text{C}$) e t é o tempo (s).

Já para as regiões superficiais da estrutura, onde ocorrem as trocas de calor com o meio, é aplicada a Lei de Newton de transferência de calor, Equação 5:

$$q = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_a) \quad (5)$$

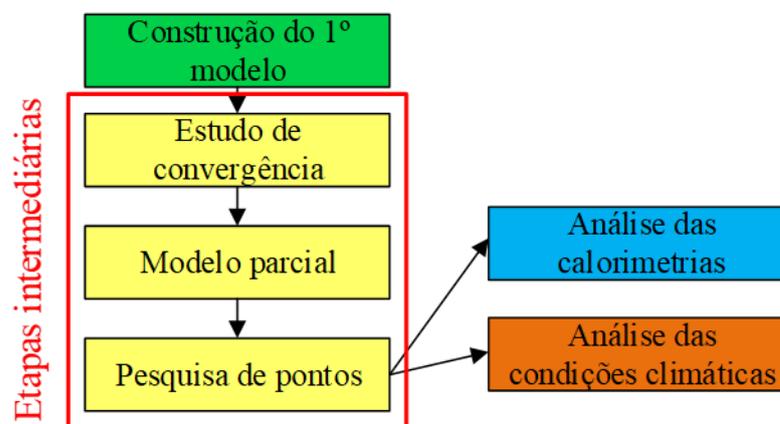
Onde q é o fluxo de calor por área (kJ/m^2), h_c é o coeficiente de troca de calor convectiva, A é a área de contato (m^2), T_s é a temperatura na superfície da estrutura e T_a é a temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$).

A criação do primeiro modelo de fundação seguiu os passos que estão apresentados no Apêndice A, onde é descrito um tutorial para montagem do modelo e realização de simulação. Com este modelo pronto, seguiu-se uma sequência de etapas de melhorias do modelo para os estudos posteriores. O primeiro deles foi o estudo de convergência, onde foram testadas malhas com diferentes níveis de refinamento buscando o equilíbrio entre precisão nos resultados e custo computacional. Foram testadas malhas com a distância entre os nós variando de 0,4 até 1,2m, sendo o menor valor escolhido devido à limitação de nós e elementos suportados na versão estudantil do software, e parou-se no valor maior pelo aspecto grosseiro apresentado pela malha desta dimensão.

A segunda etapa foi a elaboração de um modelo parcial da estrutura, que foi possibilitado devido à fundação possuir simetria em torno do seu eixo central, de forma que foi avaliado o ganho de tempo nas simulações proporcionado por esse modelo. A terceira etapa foi o teste de vários pontos da estrutura em busca daqueles que representariam da melhor forma os resultados obtidos e contribuiriam mais para as análises propostas. Foram testados pontos nas mesmas posições dos termopares das fundações reais, uma série de pontos no eixo central buscando onde ocorrem as maiores temperaturas da estrutura e uma série de pontos nas zonas superficiais, para ajudar a explicar os fenômenos de trocas de calor com o meio.

Dessa forma, essas etapas intermediárias que se constituíram entre a construção do primeiro modelo e as análises paramétricas são sintetizadas no fluxograma da Figura 23 abaixo.

Figura 23 — Etapas intermediárias da construção do modelo da fundação



Fonte: o Autor.

Concluídas as etapas intermediárias da construção do modelo, foram feitas as simulações correspondentes aos estudos paramétricos: os testes de amostras de cimento com diferentes perfis calorimétricos e os estudos de variações nas condições climáticas. No primeiro caso, foram feitas simulações alterando apenas as curvas de geração de calor, e os resultados foram avaliados individualmente para cada tipo de cimento. Depois de analisar o comportamento das curvas de temperatura, foram extraídos os valores dos pontos de máxima temperatura acompanhados de seu momento de ocorrência. Esses parâmetros foram cruzados com os da calorimetria em análises de regressão linear, buscando as combinações que apontassem melhor previsibilidade dos efeitos nas estruturas a partir do comportamento do material.

As análises de condições climáticas utilizaram o perfil calorimétrico do CP III, e testaram três amplitudes térmicas e três fatores de troca de calor convectiva (h_c) diferentes, de modo que quanto uma característica foi mudada, a outra permaneceu constante. Assim, resultaram 6 simulações, onde as diferentes amplitudes térmicas foram testadas com o h_c intermediário, e os diferentes valores de h_c foram testados com os dados de temperatura de Fortaleza. Os resultados foram expostos em gráficos para análise dos comportamentos produzidos e, em seguida, foram calculados os gradientes térmicos entre o centro da estrutura e a sua superfície, para análise do risco de fissuração devido a esta manifestação patológica.

3.2.2 Estudo de caso

O estudo de caso deste trabalho consistiu em uma análise comparativa dos dados das duas estruturas apresentadas na seção de materiais, com o objetivo de avaliar o impacto das condições climáticas analisadas por meio de simulação.

A fundação de torre eólica foi nomeada como estrutura teste, visto que está localizada em um parque em zona litorânea, e está exposta às variações conjuntas de temperatura ambiente, velocidade do vento e radiação solar. Já a laje de reação, denominada estrutura controle, por ter sido concretada no interior de um prédio pré-existente, esteve protegida de mudanças bruscas nas variáveis já citadas.

Como as estruturas possuem geometrias, concretos e processos construtivos diferentes, não foi possível obter valores numéricos que relacionassem ambas diretamente. Dessa forma, a estratégia adotada foi avaliar os gráficos e verificar se ocorreu o mesmo fenômeno apresentado nas simulações, quando se comparou casos de parâmetros fixos (valores médios) e variáveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Construção do modelo

A definição da malha que foi utilizada nas simulações foi feita no estudo de convergência, no qual foram testadas as malhas com as distâncias entre nós apresentados na Tabela 6.

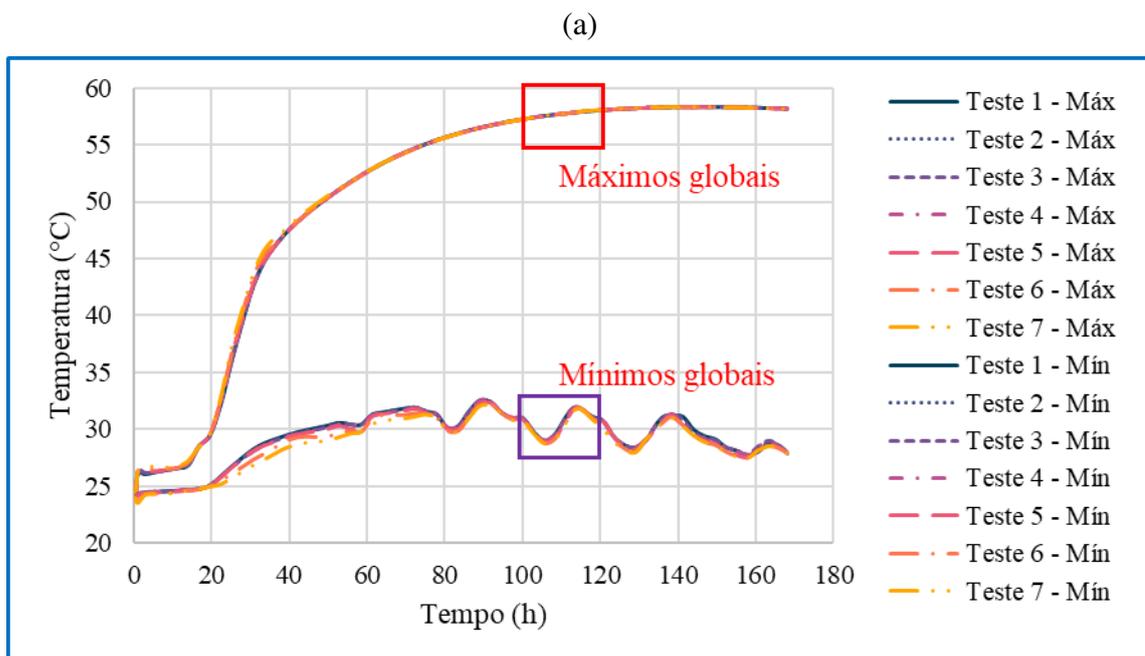
Tabela 6 — Tamanhos de malha testados no estudo de convergência

Teste	1	2	3	4	5	6	7
Distância entre nós (m)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0	1,2

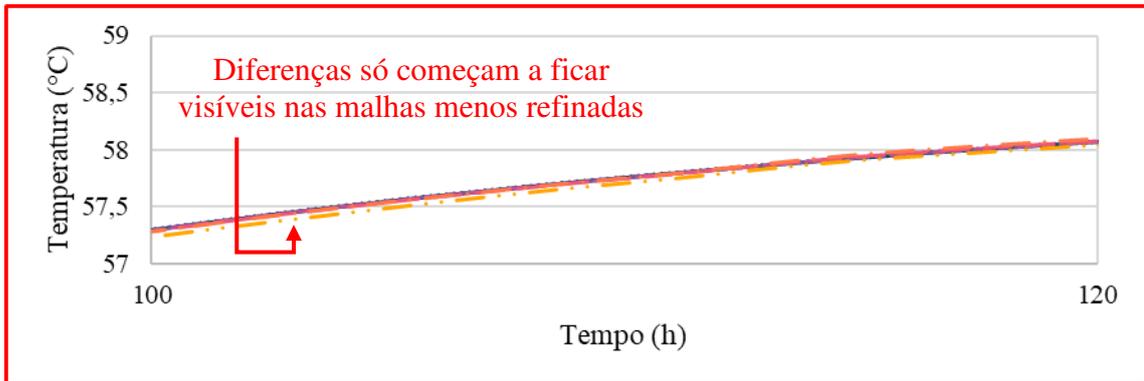
Fonte: o Autor.

Foram analisados os dados de temperatura máxima e mínima globais da estrutura em cada teste, e os resultados estão apresentados na Figura 24a. Como os valores ficaram muito próximos, foram feitos recortes das máximas (Figura 24b) e das mínimas (Figura 24c), para que as diferenças provocadas pela mudança no refino da malha pudessem ser melhor observadas.

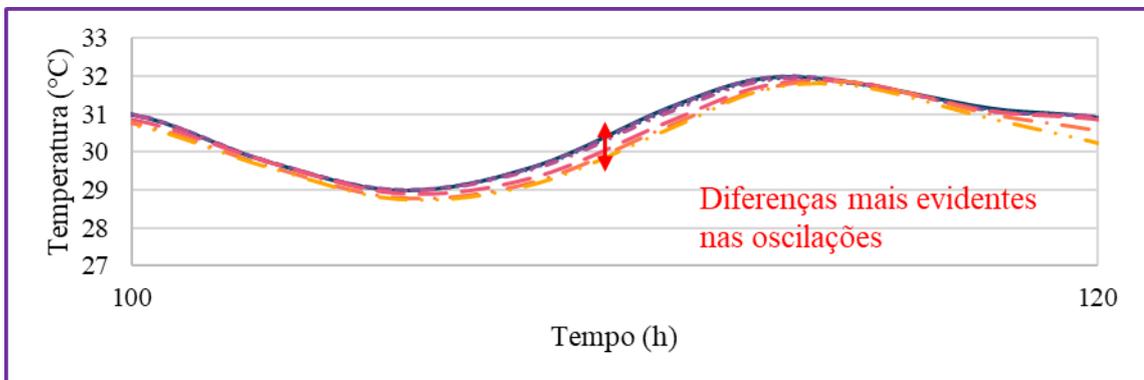
Figura 24 — Simulações do estudo de convergência (a), com ampliações das máximas (b) e mínimas (c)



(b)



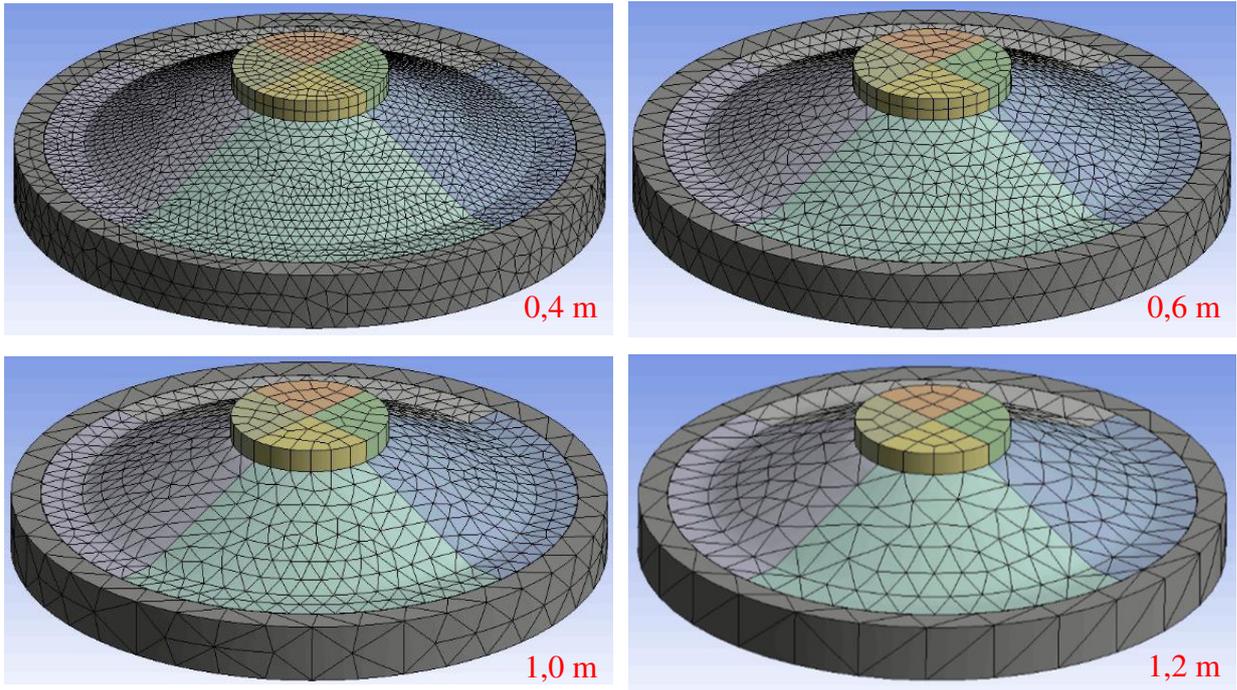
(c)



Fonte: o Autor.

As diferenças nas temperaturas calculadas só começam a se destacar nas malhas mais grossas, e ainda assim, analisando os valores numéricos, só são encontradas diferenças entre a malha mais refinada (0,4 m) e a menos refinada (1,2 m) na segunda casa decimal. Entretanto, observando a Figura 25, pode-se perceber que a malha de 0,4 m gera uma densidade muito alta de nós, enquanto as malhas mais grossas, como a de 1,2 m, deixam grandes distâncias entre os nós relativamente às dimensões da peça. Assim, considerando tais observações, foi escolhida a malha de 0,6 m para realizar as simulações seguintes.

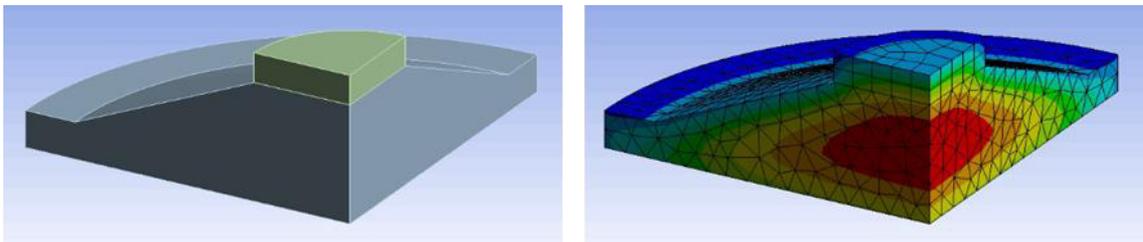
Figura 25 — Maiores e menores malhas testadas durante o estudo de convergência



Fonte: O Autor.

Como esta fundação apresentou uma geometria axissimétrica, apresentou-se a possibilidade de construir um modelo de apenas uma fração, com o intuito de diminuir o tempo e o esforço computacional gasto nas simulações. Esse modelo foi construído e está apresentado na Figura 26.

Figura 26 — Modelo parcial da fundação



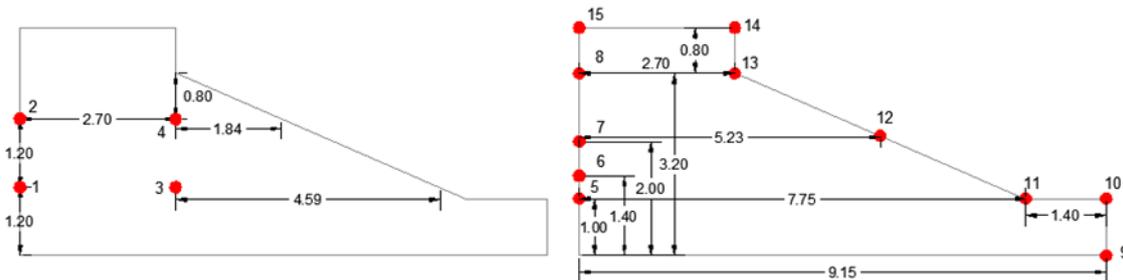
Fonte: o Autor.

Como resultado, obteve-se uma redução do tempo de simulação do modelo completo de 79 segundos para 21 segundos no modelo parcial, ou seja, uma redução a aproximadamente um quarto do tempo, com os mesmos resultados da simulação obtidos. Entretanto, foi escolhido o modelo completo para seguir com as simulações pelo fato de que a axissimetria foi uma condição apenas desta fundação, ou seja, para outras pesquisas mais gerais,

onde esta condição não se repetisse, seria necessário construir um modelo da fundação completa. Além disso, o tempo de pouco mais de um minuto não foi considerado demorado quando levado em conta o número de simulações realizadas na execução deste trabalho, que foi inferior a 30.

Em seguida, foram inseridos pontos de pesquisa de onde seriam retiradas as informações de temperatura para análise dos resultados. A Figura 27 apresenta esquematicamente todos os pontos testados neste trabalho. Os pontos 1 a 4 se localizam nas mesmas posições dos termopares que fizeram o monitoramento das fundações em campo, e seus dados foram utilizados para o estudo de caso. Os pontos 5 a 8 serviram para pesquisar em que altura da região central a temperatura é mais alta, e os pontos 9 a 15 foram testados para selecionar em quais regiões os efeitos de trocas de calor foram mais acentuados.

Figura 27 — Esquema de posicionamento de pontos de aquisição de dados nas simulações



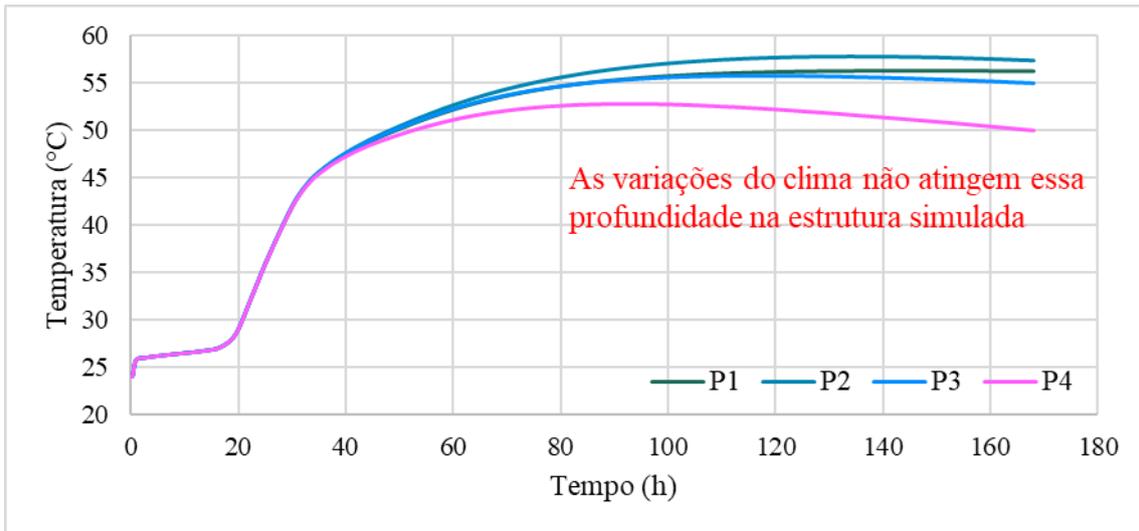
Fonte: o Autor.

Com os dados de uma das primeiras simulações, foram extraídos os resultados para todos os pontos descritos, e os resultados são apresentados na Figura 28. O comportamento das curvas em (a) se apresentou diferente do observado nos dados de campo, principalmente nos pontos P3 e P4, que são os mais próximos da superfície dentre estes, mas apenas P4 apresentou um decaimento da temperatura mais rápido por estar mais afastado do centro. No gráfico da Figura 28b, constatou-se que as temperaturas mais altas são desenvolvidas na altura média da estrutura, em P7, de forma que análises que envolvam as maiores temperaturas foram feitas observando os resultados neste ponto. Já no gráfico da Figura 28c, destaque para P14, que apresenta menores temperaturas por estar mais distante do centro da estrutura e, complementarmente, por apresentar duas faces expostas ao meio. Isso o torna mais sensível às variações do ambiente e, portanto, foi selecionado para analisar o efeito das variáveis climáticas. Os comportamentos diferentes de P9 e P10 justificam-se porque P9 apresenta duas faces em contato com o solo, realizando trocas de calor por condução, e P10 apresenta uma face

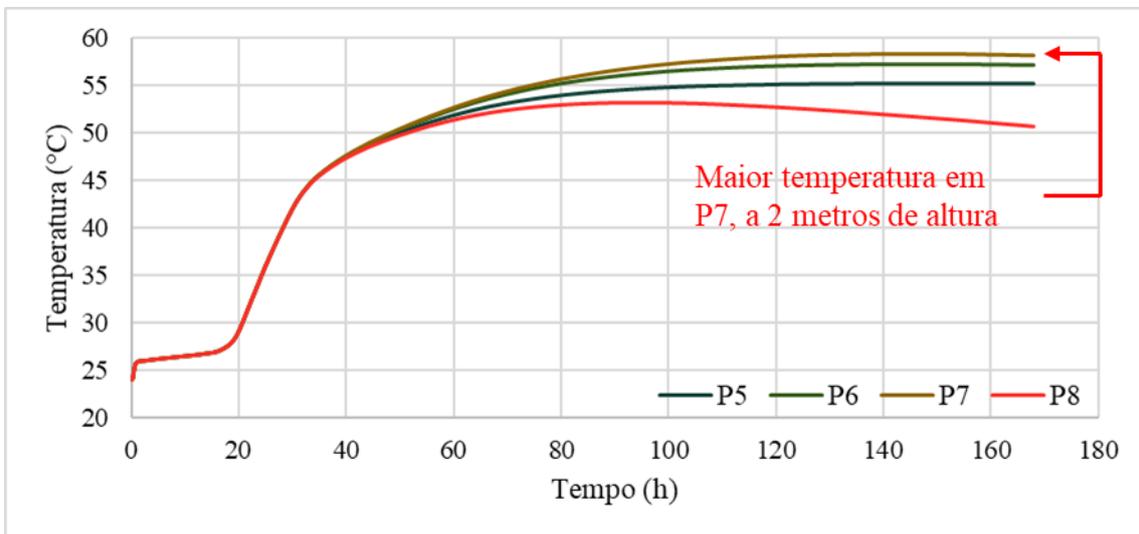
em contato com o solo e a outra exposta ao ar, sendo assim um intermediário entre P9 e os demais.

Figura 28 — Resultados simulados para análise dos pontos de P1 a P4 (a), de P5 a P8 (b) e de P9 a P15 (c)

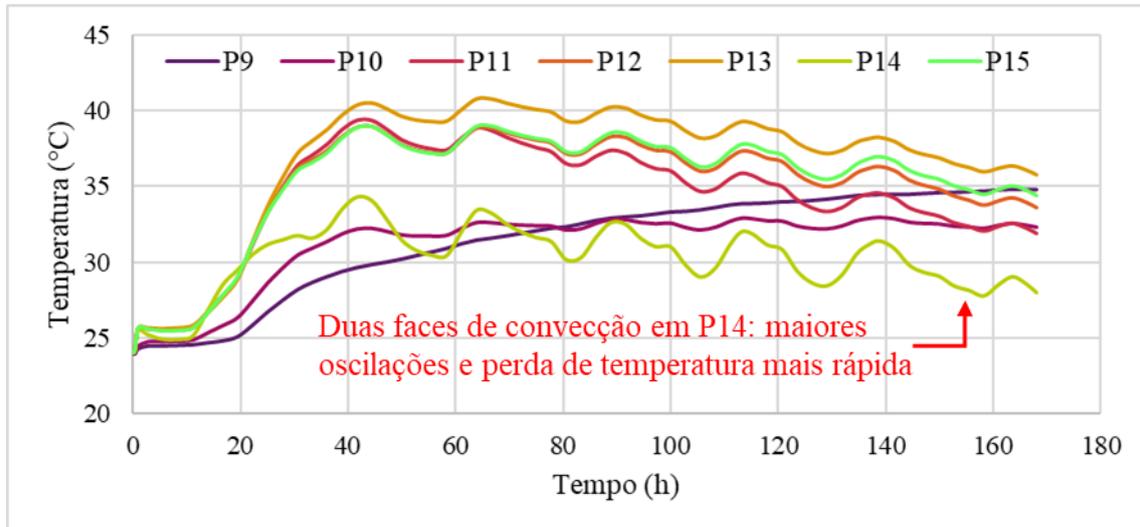
(a)



(b)



(c)

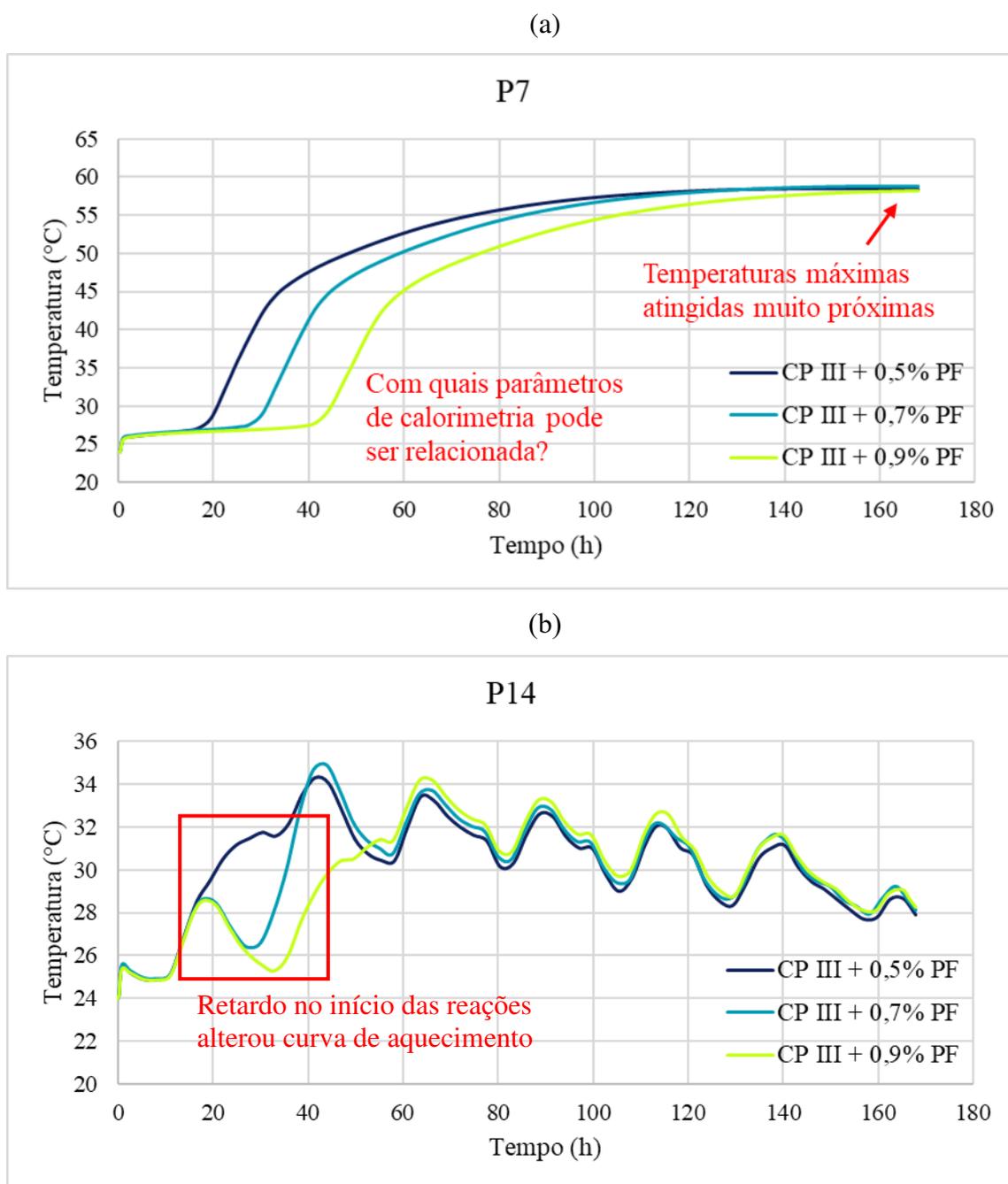


Fonte: o Autor.

4.2 Análises de temperaturas com diferentes calorimetrias

Após as escolhas dos pontos para análise, foram realizadas as simulações com alteração das calorimetrias. A Figura 29 apresenta os resultados das simulações das três amostras de CP III com o uso de aditivo polifuncional para os pontos P7 (a) e P20 (b). Observando P7, percebe-se o efeito do aumento no período de indução do cimento, mostrando um retardo no período de 20 a 40 horas para o início da elevação das temperaturas. Esse efeito retardante também atrasa o momento de ocorrência das temperaturas máximas, mas não influencia nos valores atingidos. Os valores de temperaturas máximas junto ao momento em que ocorrem são apresentados na Tabela 7.

Figura 29 — Resultado das simulações com CP III para três teores de aditivo polifuncional nos pontos P7 (a) e P14 (b)



Fonte: o Autor

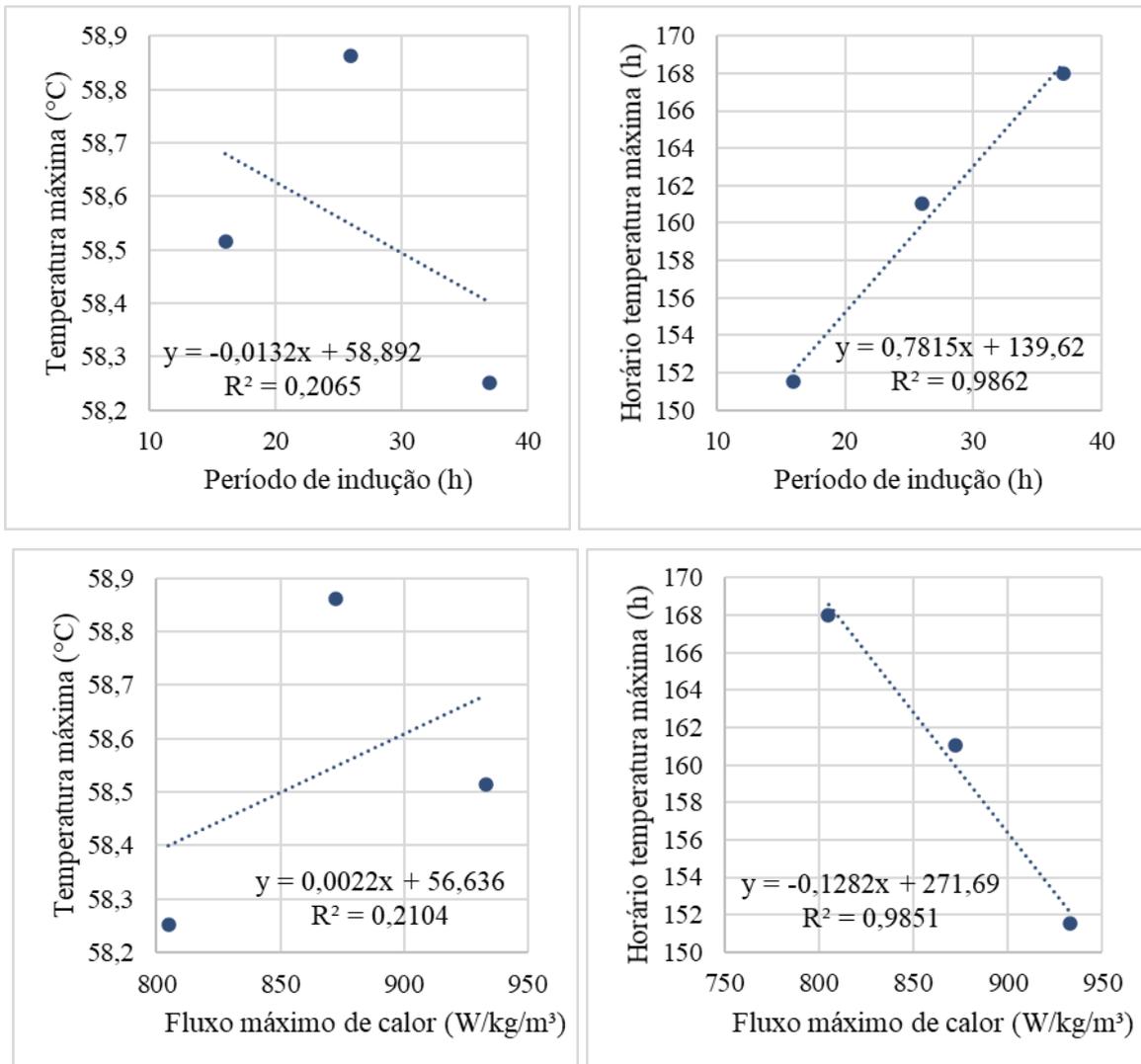
Tabela 7 — Temperaturas máximas atingidas nas simulações e seus momentos de ocorrência

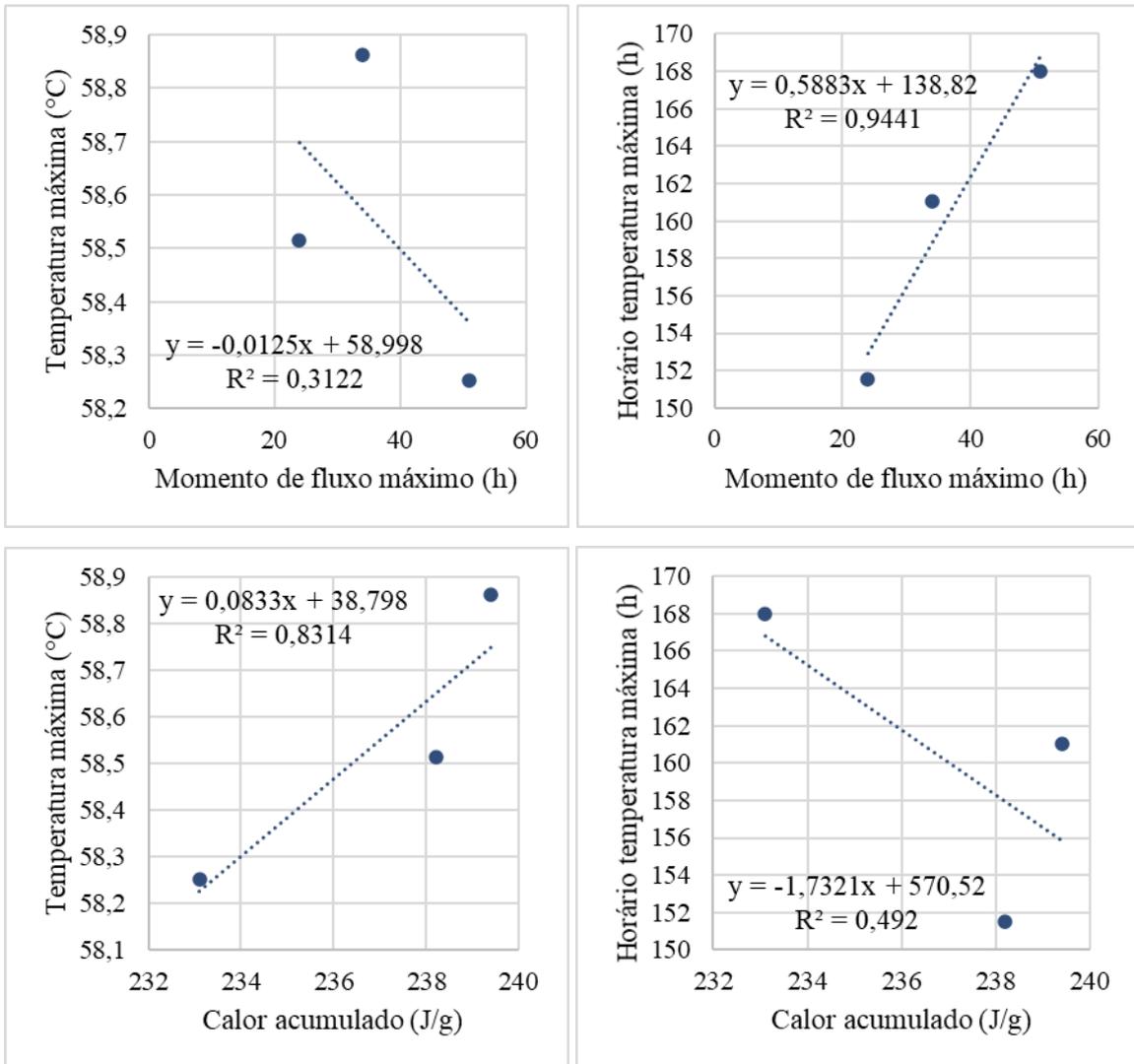
	CP III + 0,5% PF	CP III + 0,7% PF	CP III + 0,9% PF
Temperatura máxima (°C)	58,52	58,86	58,25
Momento de ocorrência (h)	151,54	161,06	168,00

Fonte: o Autor.

Estes parâmetros das simulações foram combinados com os parâmetros já apresentados das curvas calorimétricas do cimento: período de indução, pico de liberação de calor e momento de ocorrência deste pico. Assim, foram traçados gráficos para as 8 combinações possíveis e feitas análises de regressão linear para identificar quais apresentariam boa correlação. Os resultados estão apresentados na Figura 30.

Figura 30 — Estudos de regressão linear para as amostras de CP III





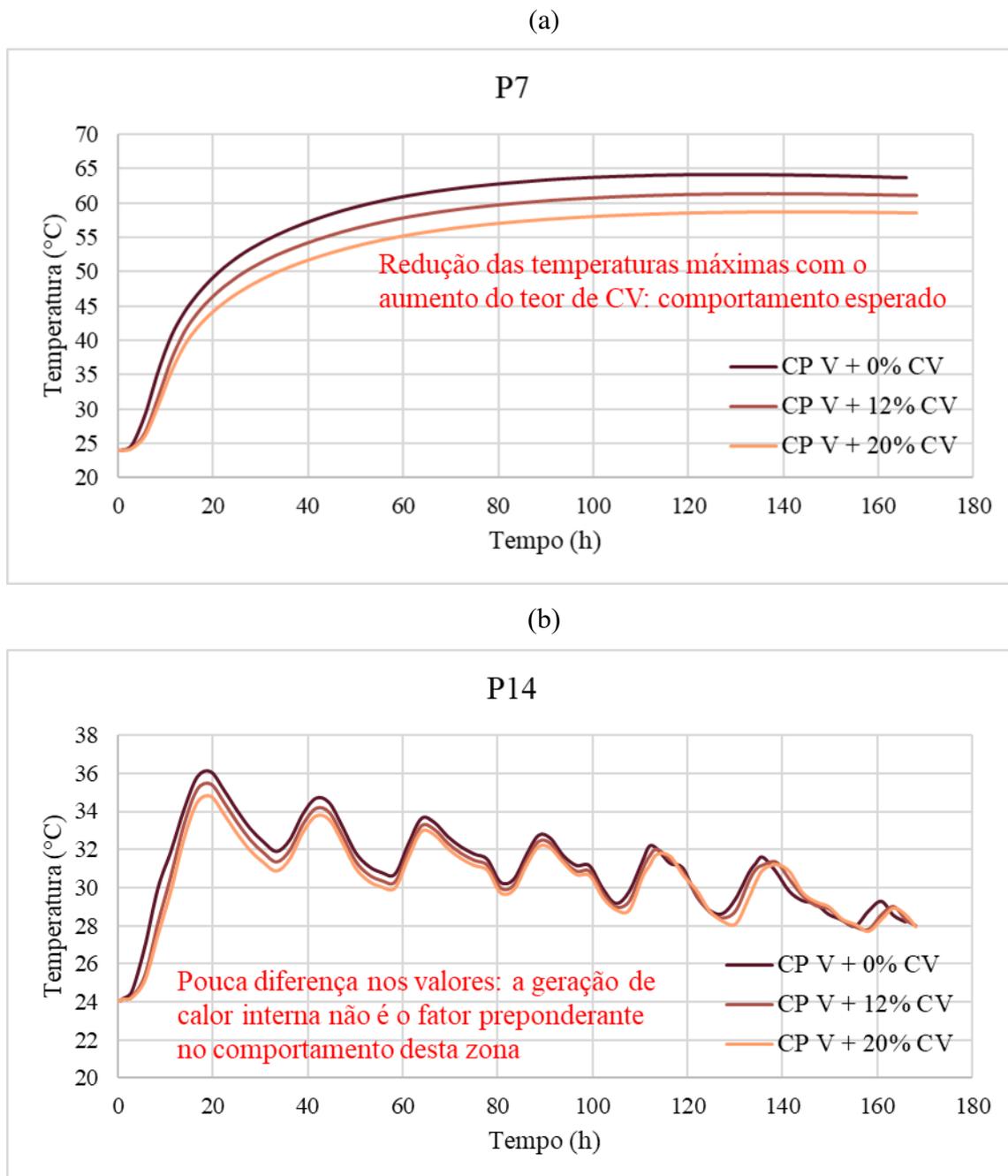
Fonte: o Autor

No geral, os índices de correlação que utilizaram a temperatura máxima foram baixos e os que utilizaram o horário de temperatura máxima foram altos. Deve ser observado que as temperaturas máximas, apesar de não seguirem um padrão, diferiram entre si menos de 1°C, e confirmam que a mesma quantidade de cimento reagiu, ou seja, a mesma quantidade de calor acumulado foi liberada. Já as regressões que utilizaram o momento de temperatura máxima, comprovam o efeito e boa reatividade do aditivo com o cimento, de modo que essa previsibilidade esperada pode ser agregada ao planejamento da obra. Etapas de concretagem em camadas, retirada de fôrmas, aplicação sistemas de resfriamento, podem ser planejadas para reduzir esses picos.

Em seguida, foram realizadas simulações com as calorimetrias de CPV com substituição de cinza volante, e novamente são apresentados os resultados dos pontos P7 e P14

na Figura 31, acompanhados dos valores de temperaturas máximas e momento de ocorrência na Tabela 8.

Figura 31 — Resultado das simulações com CP V para três teores de substituição por cinza volante nos pontos P7 (a) e P14 (b)



Fonte: o Autor.

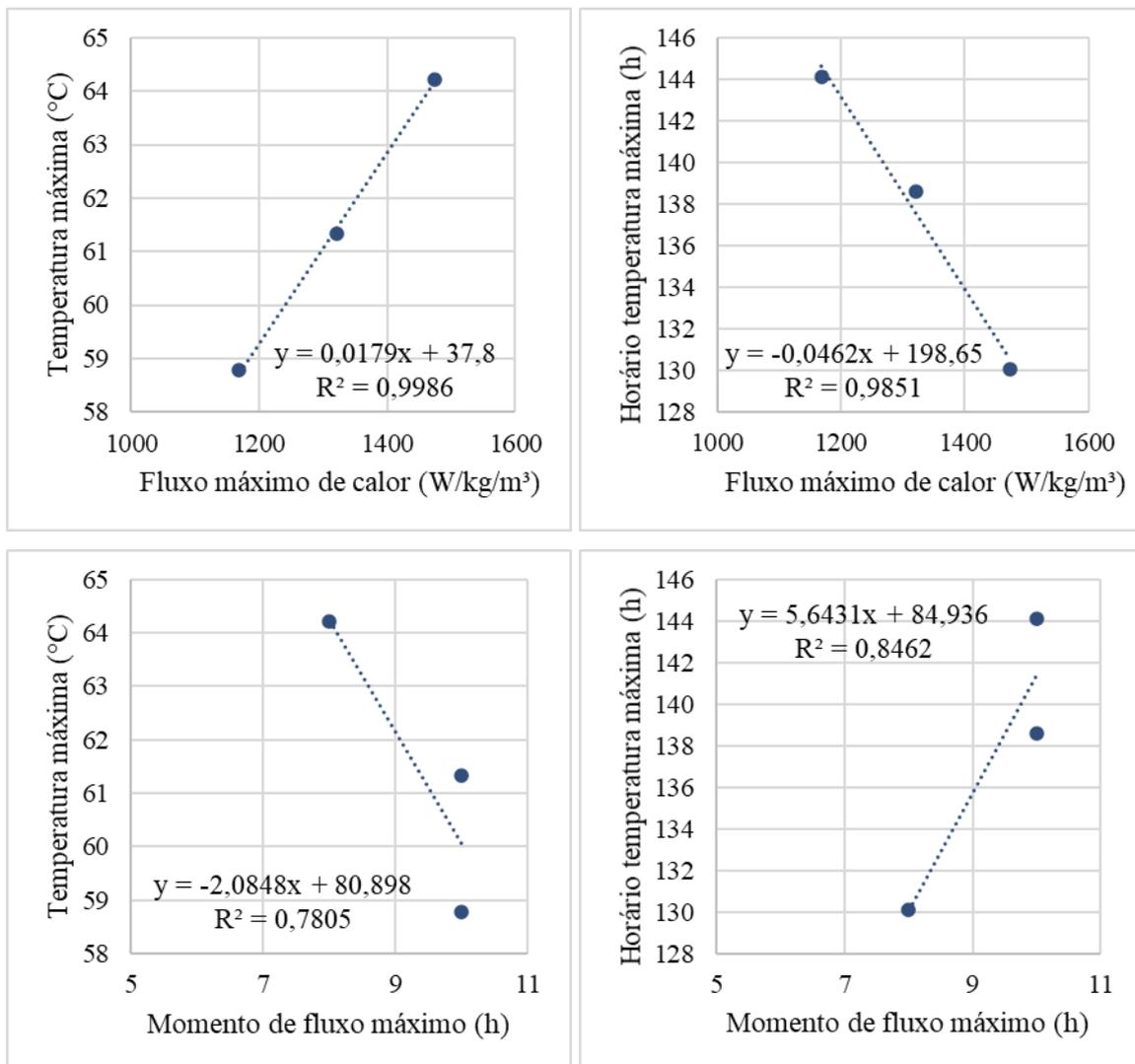
Tabela 8 — Temperaturas máximas atingidas nas simulações e seus momentos de ocorrência

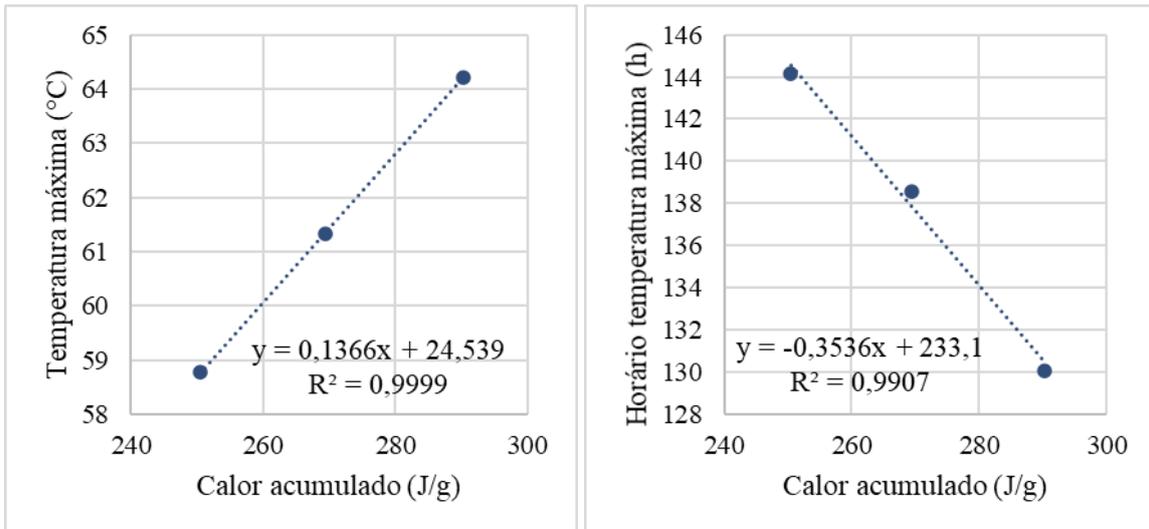
	CP V + 0% CV	CP V + 12% CV	CP V + 20% CV
Temperatura máxima (°C)	64,22	61,33	58,77
Momento de ocorrência (h)	130,08	138,59	144,14

Fonte: o Autor.

O mesmo processo de combinação de parâmetros das curvas de calorimetria com parâmetros das curvas de temperatura foi repetido para o CP V, com a diferença de que o mesmo não possui um período de indução definido, gerando assim 6 análises de regressão linear. Os resultados estão apresentados na Figura 32.

Figura 32 — Estudos de regressão linear para as amostras de CP V





Fonte: o Autor.

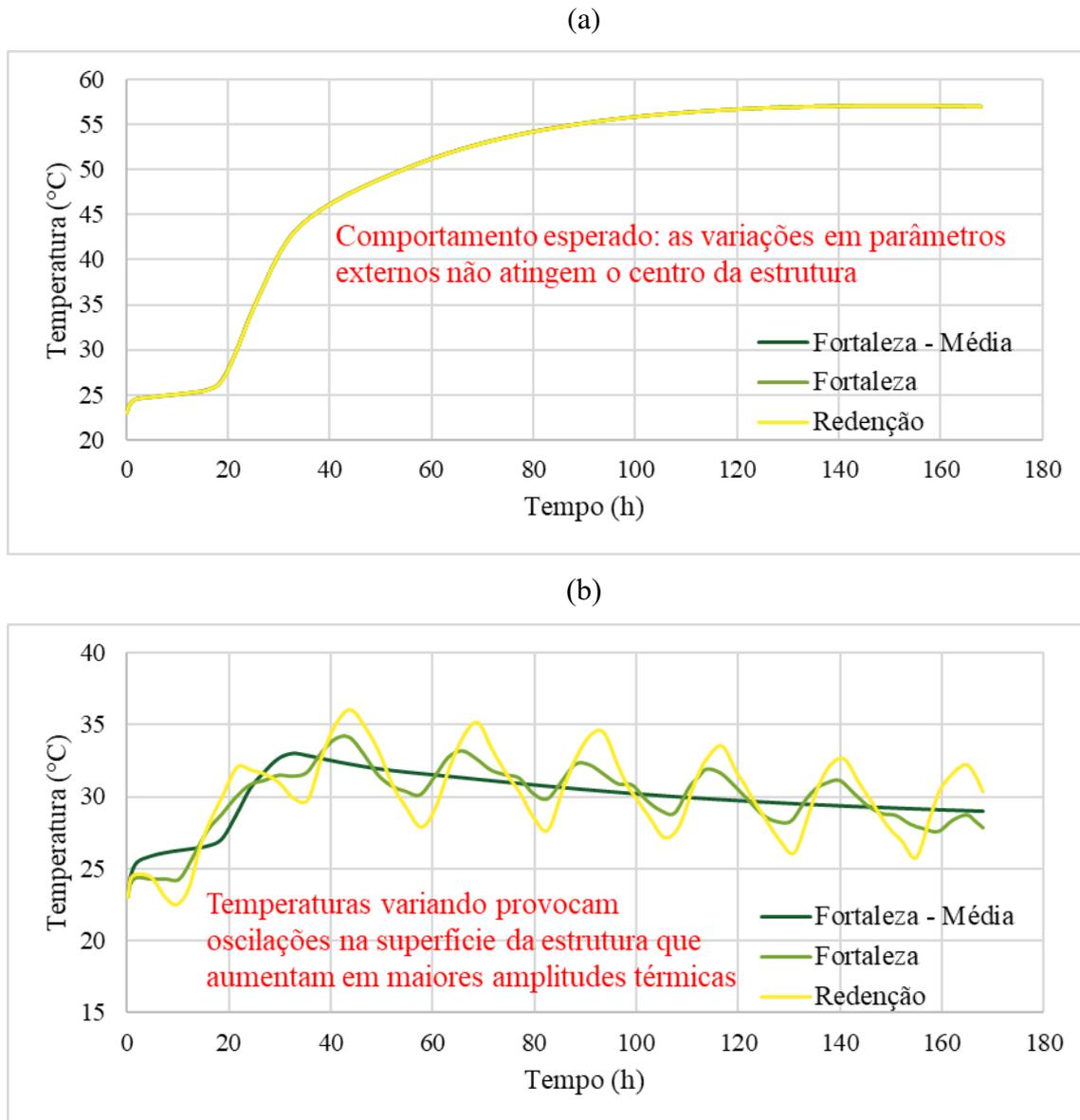
Aqui, o destaque vai para as correlações estabelecidas com o pico de liberação de calor durante a calorimetria e para o calor acumulado após 168 horas, uma vez que já é esperada que a substituição de cimento por cinza volante reduza as temperaturas máximas atingidas. Já quanto ao horário do pico das reações, não se esperam grandes mudanças, uma vez que a amostra apenas vai ter sua massa de cimento reduzida, não afetando a cinéticas das reações.

A boa previsibilidade observada tanto nas simulações quanto nos estudos de regressão linear dos cimentos com modificações em suas curvas calorimétricas mostra-se como uma alternativa no projeto de fundações volumosas. Espera-se que este modelo de análise possa auxiliar na tomada de decisão quanto à escolha de materiais e etapas construtivas para evitar as manifestações patológicas já citadas de formação de etringita tardia e fissuração por formação de gradientes térmicos.

4.3 Análise das condições climáticas

Nesta etapa das simulações, foi mantido um perfil calorimétrico constante, assim como os demais parâmetros de simulação. Primeiramente, foram feitos testes utilizando os dados de temperatura das cidades de Fortaleza, com valor médio e valores variando ao longo do tempo, e Redenção, de modo que os resultados são apresentados na Figura 33. O valor de h_c utilizado aqui foi de $7,99 \text{ W/m}^2$, obtido a partir da média dos valores de velocidade do vento de Fortaleza.

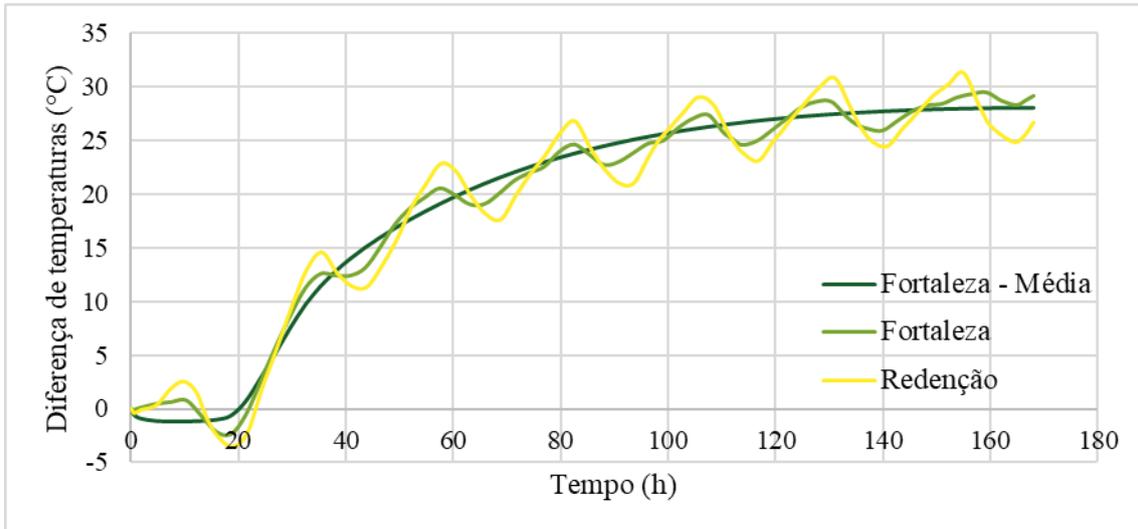
Figura 33 — Resultado das simulações para diferentes amplitudes térmicas nos pontos P7 (a) e P14 (b)



Fonte: o Autor.

O gráfico da Figura 33a mostra que as variações nas temperaturas que ocorrem no meio externo não influenciam nas temperaturas desenvolvidas no centro da estrutura, de modo que a geração de calor do material é o efeito mandatário nas temperaturas produzidas. Já observando a Figura 33b, vemos que as oscilações diárias na temperatura ambiente refletem nas zonas superficiais da estrutura, e que o aumento da amplitude térmica local também aumenta as oscilações produzidas. Essas oscilações podem contribuir para a ocorrência de gradientes térmicos capazes de provocar fissuração na estrutura, e para avaliar isso, foram plotados os resultados da diferença de temperatura entre os dois pontos na Figura 34.

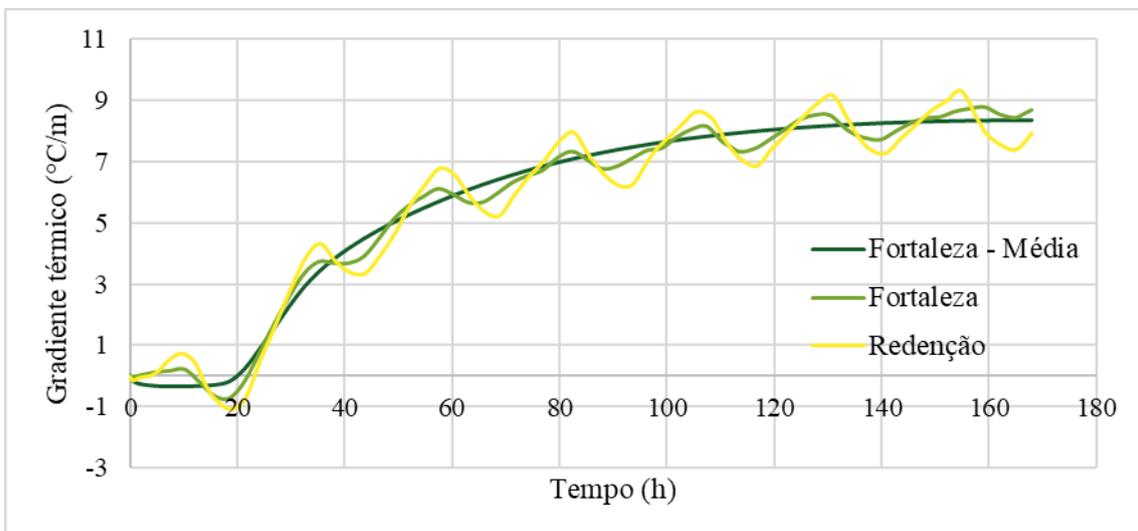
Figura 34 — Diferença de temperatura entre os pontos P7 e P14



Fonte: o Autor.

Trabalhos como Aniskin e Nguyen (2020) e Ho *et al.* (2020) adotaram como critério de risco de fissuração a ocorrência de diferenças de temperatura entre o centro e a superfície da estrutura superiores a 20°C , e esse valor é citado até na norma ACI 301-16 (2016). Aplicando esse critério às simulações realizadas aqui, todos os casos apresentariam fissuração, porém não é levada em conta a distância entre os pontos, que é parte da própria definição de gradiente. Dessa forma, uma correta representação dos gradientes térmicos é feita na Figura 35, onde o formato das curvas é mantido, mas os valores das diferenças são divididos pela distância entre os pontos P7 e P14, que é de 3,36m.

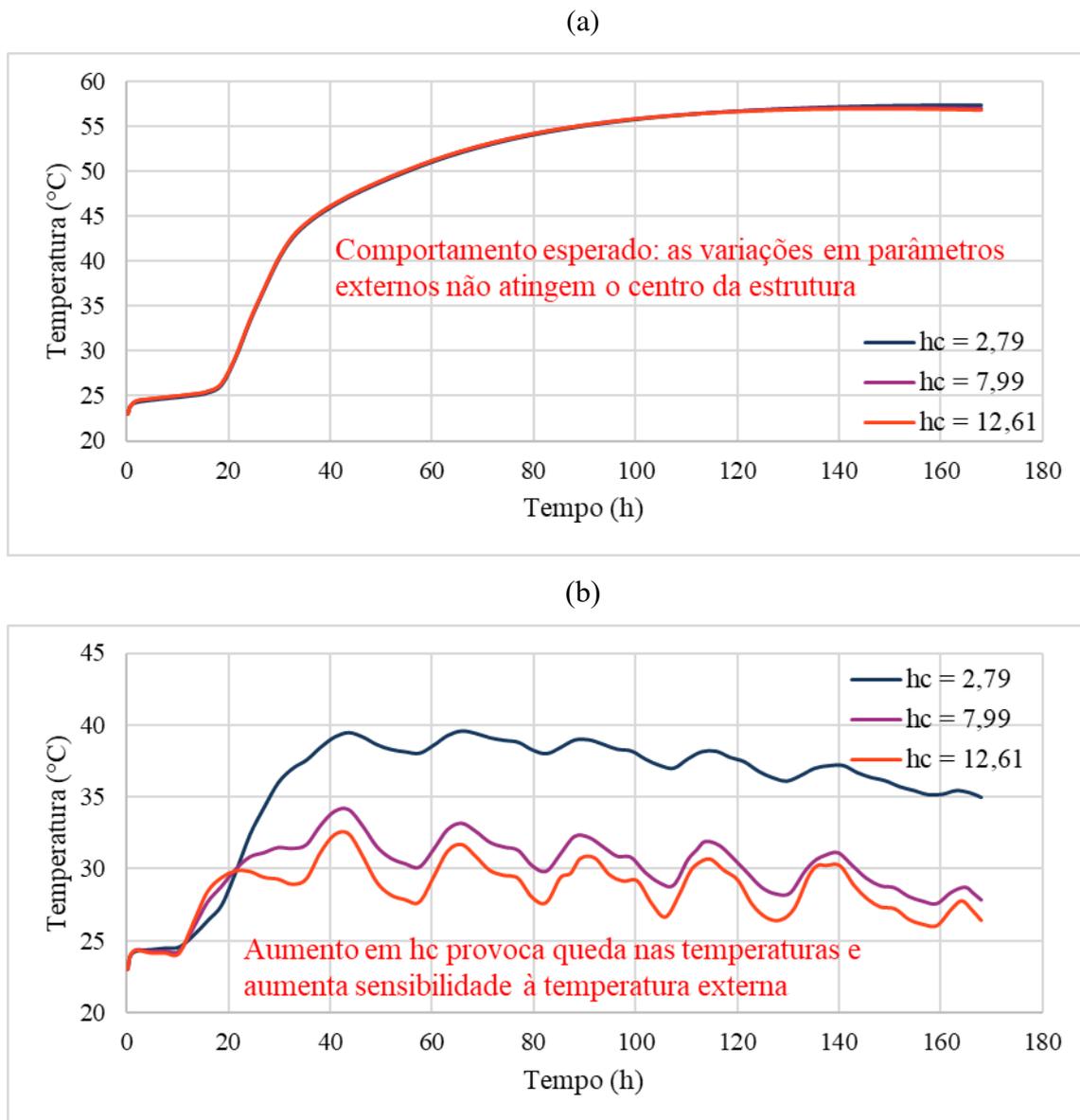
Figura 35 — Gradiente térmico entre os pontos P7 e P14



Fonte: o Autor.

Em seguida, foram feitas as simulações para os diferentes valores de h_c , e os resultados são apresentados, também para os pontos P7 e P14, na Figura 36. Nesta rodada de simulações, foram mantidos os valores de temperatura variando ao longo do tempo correspondentes aos dados da cidade de Fortaleza.

Figura 36 — Resultado das simulações para diferentes valores de h_c nos pontos P7 (a) e P14 (b)

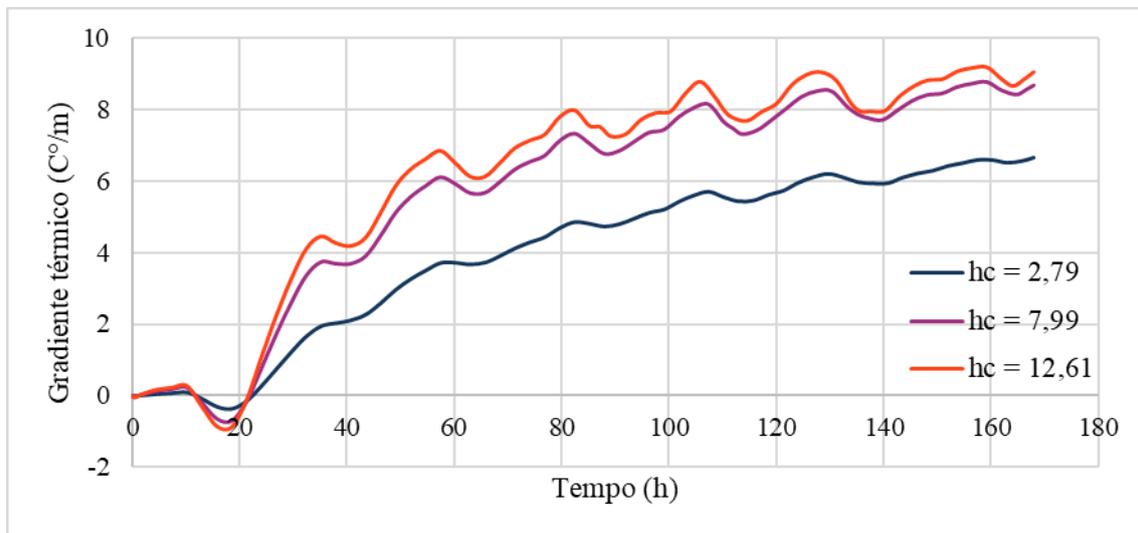


Fonte: o Autor.

Aqui, novamente, percebe-se que os efeitos externos não atingem o centro da fundação, como mostra o gráfico da Figura 36a. O que chama a atenção são os dois efeitos observados na zona superficial da mesma: o primeiro, mais predominante, é que o aumento dos

valores de h_c faz com que a estrutura perca calor com o meio mais facilmente, o que já é esperado. Já o segundo, é que o aumento nos valores de h_c também faz com que a estrutura fique mais sensível às mudanças de temperatura, tendo como resposta oscilações mais pronunciadas, como se observa na Figura 36b. Como as diferenças entre os valores de temperatura nas simulações entre o maior e o menor valor de h_c foi superior a 10°C , foi repetido o processo de cálculo do gradiente térmico entre os dois pontos apresentados da estrutura, e o resultado se encontra na Figura 37.

Figura 37 — Gradiente térmico entre os pontos P7 e P14 para diferentes valores de h_c

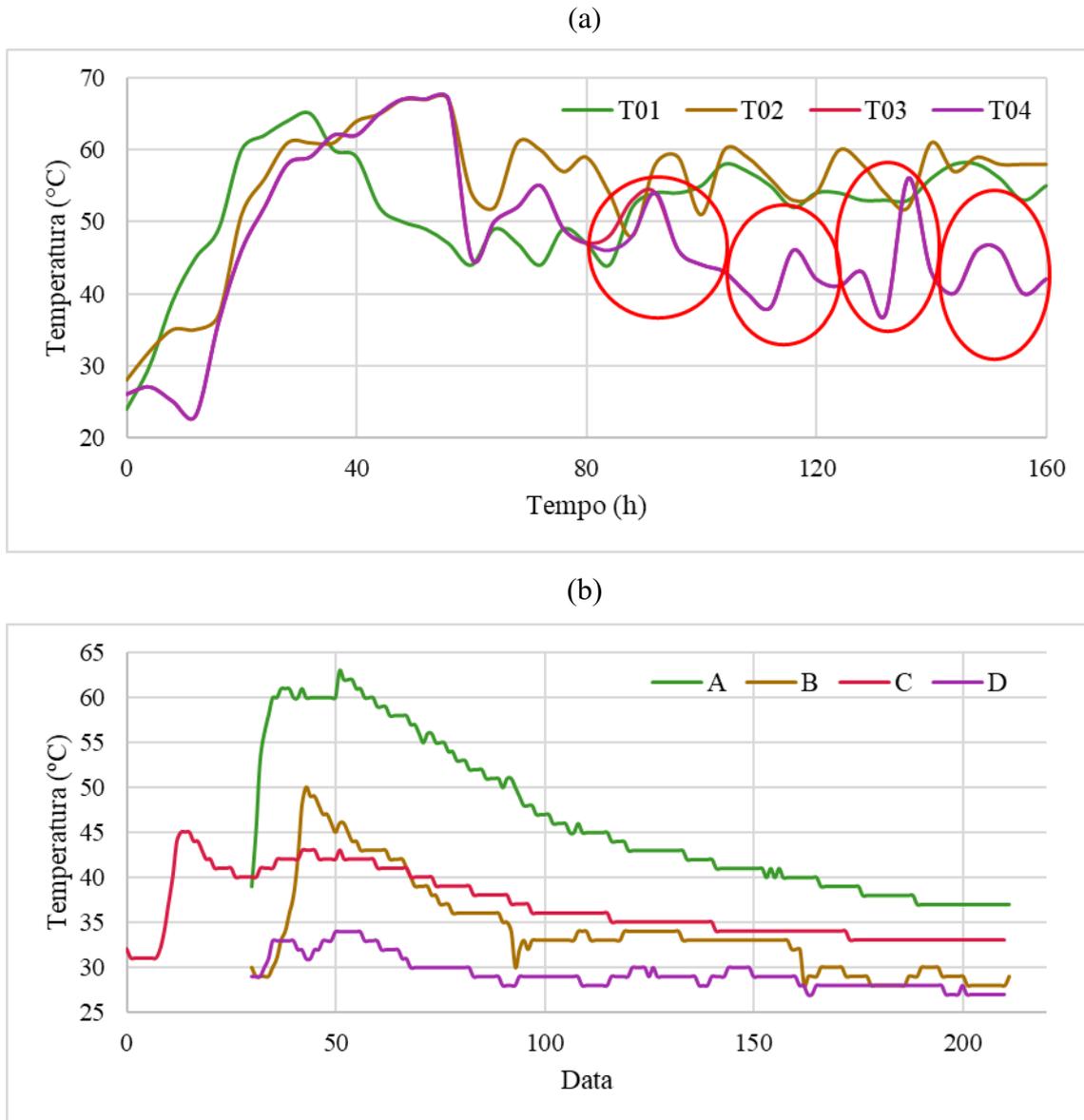


Fonte: o Autor.

4.4 Estudo de caso

No estudo de caso deste trabalho, foram analisados dados de monitoramento de duas estruturas reais: a fundação de torre eólica cuja geometria foi utilizada para execução das simulações já apresentadas, e uma laje de reação, bloco em formato de paralelepípedo cuja geometria já foi apresentada anteriormente. Os dados de monitoramento dessas duas estruturas são apresentados na Figura 38.

Figura 38 — Dados de monitoramento da fundação de torre eólica (a) e da laje de reação (b)



Fonte: o Autor.

O principal efeito observado nos dados da fundação de torre eólica (Figura 38a) é o das oscilações produzidas por efeitos climáticos, com destaque para a curva T04, que possui variações aproximadamente diárias. Elas estão destacadas no gráfico, com amplitudes que chegam a mais de 10°C. A grande diferença para os resultados obtidos das simulações é que estas não apresentaram esse comportamento de oscilações, ou seja, outras condições estão atuando para intensificar esse fenômeno. Desse modo, podem ser formuladas duas hipóteses: uma de que as propriedades térmicas reais do concreto o tornam mais suscetível às trocas de calor com o meio (maior condutividade térmica, menor calor específico), e outra de que não foi

considerada a radiação solar como fonte de calor para a estrutura, que se somaria às temperaturas no quesito de horário de exposição.

Agora, observando os dados da laje de reação (Figura 38b), as temperaturas apresentam um comportamento mais padronizado, com elevação nas primeiras horas devido às reações de hidratação estarem nos seus picos. Apenas a curva C apresenta uma segunda elevação provocada pela adição de camadas de concreto posteriormente, porém o destaque vai para o resfriamento que ocorre após as 50 horas. Todas as curvas decrescem sem apresentar as oscilações observadas na fundação de torre eólica. A principal hipótese para este fato é a de que a laje de reação, concretada em um ambiente fechado e coberto, está protegida de variações bruscas de temperatura, da velocidade e do vento e da radiação solar. Dessa forma, a estrutura se resfria até atingir o equilíbrio com o meio.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi trazer contribuições à área de estudo dos problemas térmicos desenvolvidos por fundações volumosas, por meio do uso de simulações e analisando fenômenos que alteram o processo padrão de aquecimento e resfriamento das estruturas. Aqui, o foco foi direcionado às fundações de torres eólicas, que necessitam de acompanhamento antes e após sua construção, por apresentarem riscos patológicos já discutidos.

A construção do modelo de fundação no Ansys possibilitou delinear os procedimentos de trabalho com um *software* de elementos finitos, e permitiu a construção de um apêndice, que cumpre dois objetivos: permite uma melhor reprodutibilidade do trabalho e gera uma contribuição para próximos pesquisadores que se iniciarem nesta área.

Já analisando os resultados produzidos pelas simulações, foi observado que a geração de calor do cimento é o principal fator que contribui para o atingimento das temperaturas máximas da estrutura. Assim, alterando parâmetros de calorimetria do ligante, foi possível modificar os valores e momento de ocorrência desses máximos. Por outro lado, as trocas de calor das zonas superficiais são mais influenciadas pelos fatores ambientais, e as oscilações que os mesmos provocam podem contribuir para a geração de gradientes térmicos que podem levar a estrutura à fissuração.

As simulações com CP III mostraram boas correlações entre as temperaturas e os parâmetros de período de indução e fluxo máximo de calor, características que são diretamente afetadas pelo acréscimo de aditivo na mistura. Já nas simulações com o CP V, as melhores correlações obtidas foram aquelas que acompanharam a redução do pico de liberação de calor provocada pelo crescente teor de substituição de cimento por cinza volante. Sabe-se que esses resultados são restritos a essas amostras de cimento e combinações deste com aditivos/adições, mas espera-se, principalmente, que esse método de análise possa ser reproduzido para outras situações e para as tomadas de decisão relativas à escolha de materiais.

Já as simulações realizadas com alteração dos parâmetros climáticos contribuíram para a construção de um modelo mais fiel à realidade, uma vez que foi mostrada a importância das trocas de calor que ocorrem nas zonas superficiais da estrutura. Essas trocas provocam oscilações de temperatura que podem levar à formação de fissuras devido aos gradientes térmicos produzidos, e daí se evidencia a necessidade de considerá-las nas simulações, apesar de não terem sido observados critérios de fissuração que levem em conta o correto cálculo do gradiente térmico entre dois pontos. Deve ser ressaltado o efeito duplo do aumento no fator de

troca convectiva, que além de provocar uma redução na temperatura das zonas superficiais, aumentou a amplitude das oscilações devido à temperatura externa.

Também o estudo de caso contribuiu para demonstrar a importância de uma boa representação das condições climáticas na modelagem, uma vez que os dados analisados das fundações reais corroboraram a importância dos efeitos do meio externo nas trocas de calor. Apesar de não terem sido comparados diretamente, os dados de monitoramento da fundação também foram úteis para guiar o desenvolvimento do modelo, e avaliar seu nível de proximidade com a realidade.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para próximas pesquisas que venham a abordar esta temática, sugere-se que seja avaliado o efeito para as simulações da aplicação de valores de propriedades de materiais obtidos da região, para que se compare novamente seu desempenho com dados de fundações reais. Também neste objetivo de tornar o modelo o mais realista possível, pode-se incrementar características dos processos construtivos à simulação, como a concretagem em etapas, a colocação e retirada de formas e o uso de diferentes concretos em regiões de uma mesma peça.

O efeito das condições climáticas é um objetivo que ainda tem bastante espaço para ser desenvolvido, e um bom ponto de partida, é a consideração dos efeitos da radiação solar no aquecimento das estruturas e como ele seria bem representado. Ainda, não houve uma resposta clara do motivo para as oscilações de temperatura atingirem as zonas à profundidade de onde foram obtidos os dados de monitoramento.

Outro objetivo pode ser o de avaliar o impacto das trocas de calor solo-estrutura na temperatura da fundação, observando como as curvas se comportam em solos com diferentes propriedades, como as zonas de interface devem ser modeladas corretamente, e se há deslocamento das regiões mais quentes do interior da estrutura.

Por fim, pode-se ainda avaliar soluções para redução das temperaturas a partir da seleção dos materiais, como pela seleção de agregados com as propriedades térmicas que sejam de maior interesse, bem como a adição de materiais como fibras ou resíduos para melhorar a distribuição de calor na estrutura.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. **InfoVento 21**. São Paulo, 2021.
- ACI COMMITTEE 301. **Specifications for Structural Concrete. ACI 301-16**. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2016. ISBN: 978-1-942727-86-6.
- ALRTIMI, A.; ROUAINIA, M.; HAIGH, S. **Thermal conductivity of a sandy soil**. Applied Thermal Engineering, v. 106, p. 551-560, 2016.
- AMINE, Y.; LEKLOU, N.; AMIRI, O. **Effect of supplementary cementitious materials (scm) on delayed ettringite formation in heat-cured concretes**. Energy Procedia, v. 139, p. 565–570, 2017.
- ANISKIN, N. A.; NGUYEN, T. C. **The effect of formworks on the temperature regime in the mass concrete**. Magazine of Civil Engineering, v. 99, n. 7, 2020.
- BETIOLI, A. M.; GLEIZE, P. J. P.; SILVA, D. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Effect of HMEC on the consolidation of cement pastes: Isothermal calorimetry versus oscillatory rheometry**. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 5, p. 440–445, 2009.
- BUI, A. K.; NGUYEN, T. C. **The temperature field in mass concrete with different placing temperatures**. Civil Engineering and Architecture, v. 8, n. 2, p. 94–100, 2020.
- CABRAL, A. E. B.; MACHADO, A. M. L.; BABADOPULOS, L. F. DE A. L. **Aspectos de análise termomecânica e de rigidez de concretos para torres eólicas**. Concreto & Construções, v. XLVIII, n. 98, p. 47–57, 2020.
- CASTILHO, E.; SCHCLAR, N.; TIAGO, C.; FARINHA, M. L. B. **FEA model for the simulation of the hydration process and temperature evolution during the concreting of an arch dam**. Engineering Structures, v. 174, n. January, p. 165–177, 2018.
- CEARÁ, Governo do Estado; SCHUBERT, C.; ADECE; FIEC; SEBRAE. **Wind and Solar Atlas: Ceará**. 188p.: il., maps. 2019. ISBN 978-85-67342-05-4.
- CHA, S.; JIN, S. **Prediction of thermal stresses in mass concrete structures with experimental and analytical results**. Construction and Building Materials, v. 258, 2020.
- CIFUENTES, H.; MONTERO-CHACON, F.; GALAN, J.; CABEZAS, J.; CONCHA, A. M. D. **A finite element-based methodology for the thermo-mechanical analysis of early age behavior in concrete structures**. International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 13, n. 1, 2019.
- COELHO, N. A. **Um estudo numérico do efeito térmico em concreto massa**. 2012. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- COELHO, N. A. **Métodos analíticos e numéricos para o estudo dos efeitos termomecânicos no concreto massa orientados às barragens de gravidade**. 2016. Tese

(Doutorado em Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

DEFRAEYE, T.; BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. **Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling**. Energy Conversion and Management, v. 52, n. 1, p. 512-522, 2011.

DEHDEZI, P. K. **Impact of concrete thermophysical properties on pavement structural design**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 26, n. 7, p. 1–6, 2014.

GONÇALVES, L. F. **Avaliação de propriedades térmicas do concreto com cinza volante em fundação de aerogeradores**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

HUANG, Y.; LIU, G.; HUANG, S.; RAO, R.; HU, C. **Experimental and finite element investigations on the temperature field of a massive bridge pier caused by the hydration heat of concrete**. Construction and Building Materials, v. 192, p. 240–252, 2018.

IFSTTAR. **Recommendations for preventing disorders due to Delayed Ettringite Formation**. Marne-la-Vallée: Ifsttar, 2018. Technics and methods, GTI5-A, 70 p. ISBN 978-2-85782-745-0.

JEONG, D. J.; KIM, T.; RYU, J. H.; KIM, J. H. **Analytical model to parameterize the adiabatic temperature rise of concrete**. Construction and Building Materials, v. 268, p. 121656, 2021.

LACARRIÈRE L.; KNOPPIK, A.; SILVA, W.; HONORIO, T.; SMILAUER, V.; ASAMOTO, S.; FAIRBAIRN, E. **Chapter 2: Hydration and Heat Development**. Thermal Cracking of Massive Concrete Structures: State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 254-CMS. Cham: Springer, 2019.

LEKLOU, N.; NGUYEN, V.; MOUNANGA, P. **The effect of the partial cement substitution with fly ash on delayed ettringite formation in heat-cured mortars**. v. 00, n. 0000, p. 1–8, 2016.

LIM, C. KEUN; KIM, J. K.; SEO, T. S. **Prediction of concrete adiabatic temperature rise characteristic by semi-adiabatic temperature rise test and FEM analysis**. Construction and Building Materials, v. 125, p. 679–689, 2016.

MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. Third Edition. New York: McGraw-Hill, 2005

PICHELIN, A.; CARCASSÈS, M.; CASSAGNABÈRE, F.; MULTON, S.; NAHAS, G. **Sustainability, transfer and containment properties of concrete subject to delayed ettringite formation (DEF)**. Cement and Concrete Composites, v. 113, 2020.

SARGAM, Y.; FAYTAROUNI, M.; RIDING, K.; WANG, K.; JAHREN, C.; SHEN, J. **Predicting thermal performance of a mass concrete foundation – A field monitoring case study**. Case Studies in Construction Materials. v. 11, 2019.

SELLIER, A.; MULTON, S. **Chemical modelling of Delayed Ettringite Formation for**

assessment of affected concrete structures. Cement and Concrete Research, v. 108, n. May 2017, p. 72–86, 2018.

SILER, P.; KRATKY, J.; DE BELIE, N. **Isothermal and solution calorimetry to assess the effect of superplasticizers and mineral admixtures on cement hydration.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 107, n. 1, p. 313–320, 2012.

TAHERSIMA, M.; TIKALSKY, P. **Finite element modeling of hydration heat in a concrete slab-on-grade floor with limestone blended cement.** Construction and Building Materials, v. 154, n. April 2019, p. 44–50, 2017.

TAOUKIL, D.; EL BOUARDI, A.; SICK, F.; MIMET, A.; EZBAKHE, H.; AJZOUL, T. **Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood-concrete composite.** Construction and Building Materials, v. 48, p. 104–115, 2013.

THIEBAUT, Y.; MULTON, S.; SELIER, A.; LACARRIERE, L.; BOUTILLON, L.; BELILI, D.; LINGER, L.; CUSSIGH, F.; HADJI, S. **Effects of stress on concrete expansion due to delayed ettringite formation.** Construction and Building Materials, v. 183, p. 626–641, 2018.

TORRES, I. F.; ANDRADE, T. **Risk analysis of the delayed ettringite formation in pile caps foundation in the metropolitan region of Recife - PE - Brasil.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 9, n. 3, p. 357–394, 2016.

YAN, H.; HE, H.; DYCK, M.; JIN, H.; LI, M.; SI, B.; LV, J. **A generalized model for estimating effective soil thermal conductivity based on the Kasubuchi algorithm.** Geoderma, v. 353, p. 227–242, 2019.

ZHAO, Y.; LI, G.; FAN, C.; PANG, W.; WANG, Y. **Effect of thermal parameters on hydration heat temperature and thermal stress of mass concrete.** Advances in Materials Science and Engineering, v. 2021, 2021.

ZHANG, N.; WANG, Z. **Review of soil thermal conductivity and predictive models.** International Journal of Thermal Sciences, v. 117, p. 172–183, 2017.

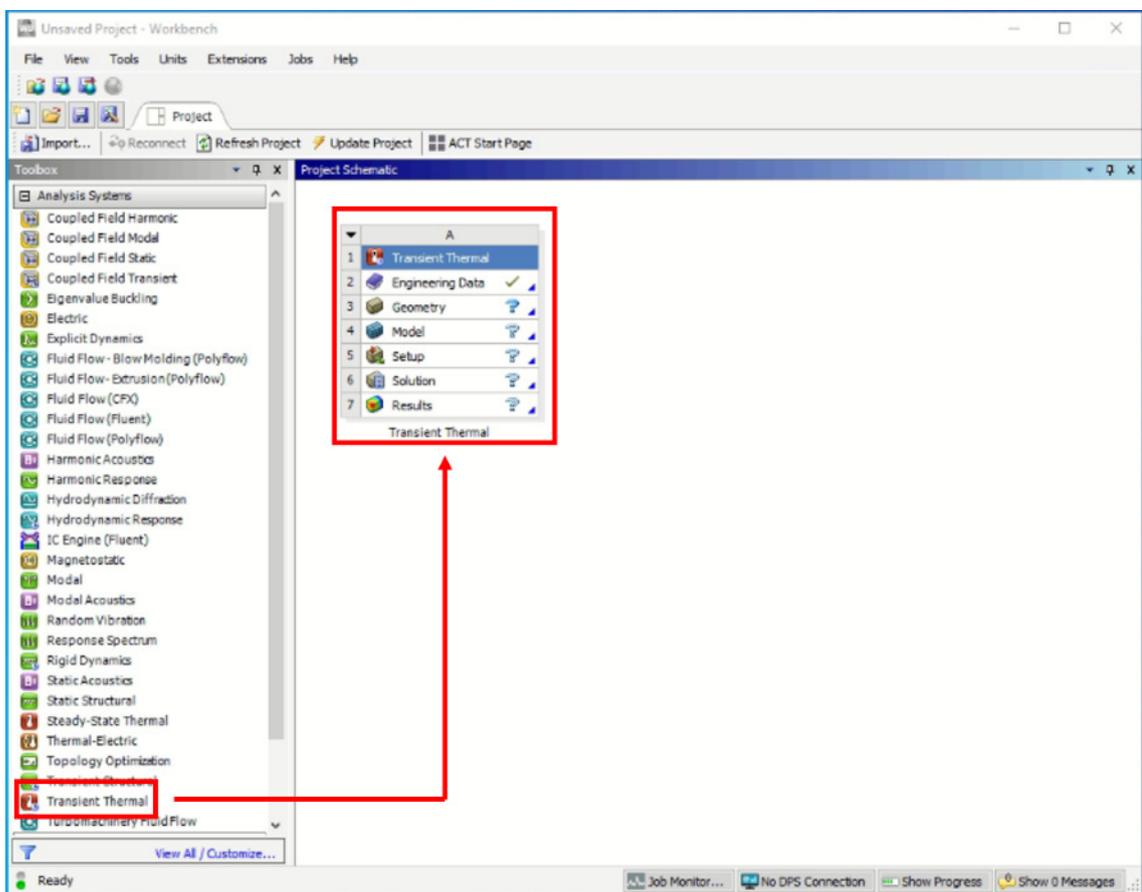
APÊNDICE A — TUTORIAL DE SIMULAÇÃO TÉRMICA NO ANSYS

Este é um tutorial para realização de simulação térmica de fundação de concreto no Ansys. Foi utilizada a versão estudantil 2021 R1.

1. Iniciando a simulação

Ao iniciar o Workbench, clique na opção *Transient Thermal* na coluna da esquerda e arraste-a para a área em branco (Figura 39).

Figura 39 — Seleção do tipo de análise

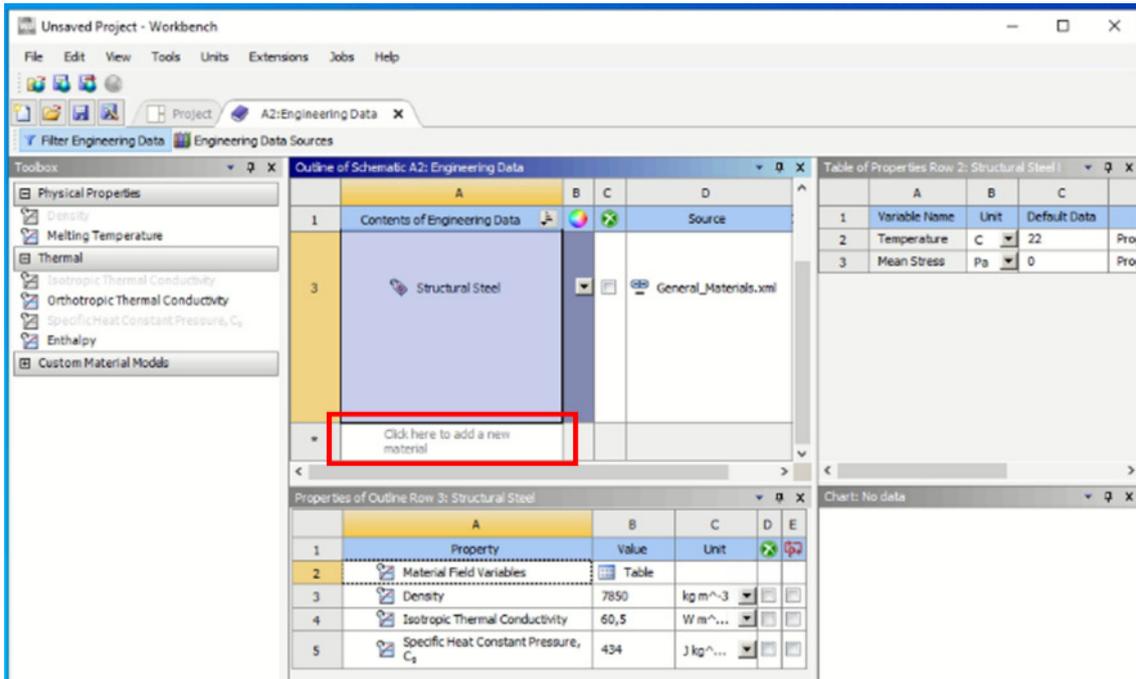


Fonte: o Autor.

2. Criando os materiais

Dê um clique duplo em *Engineering Data*, e na janela que se abre, clique na coluna central em *Click here to add a new material* (Figura 40).

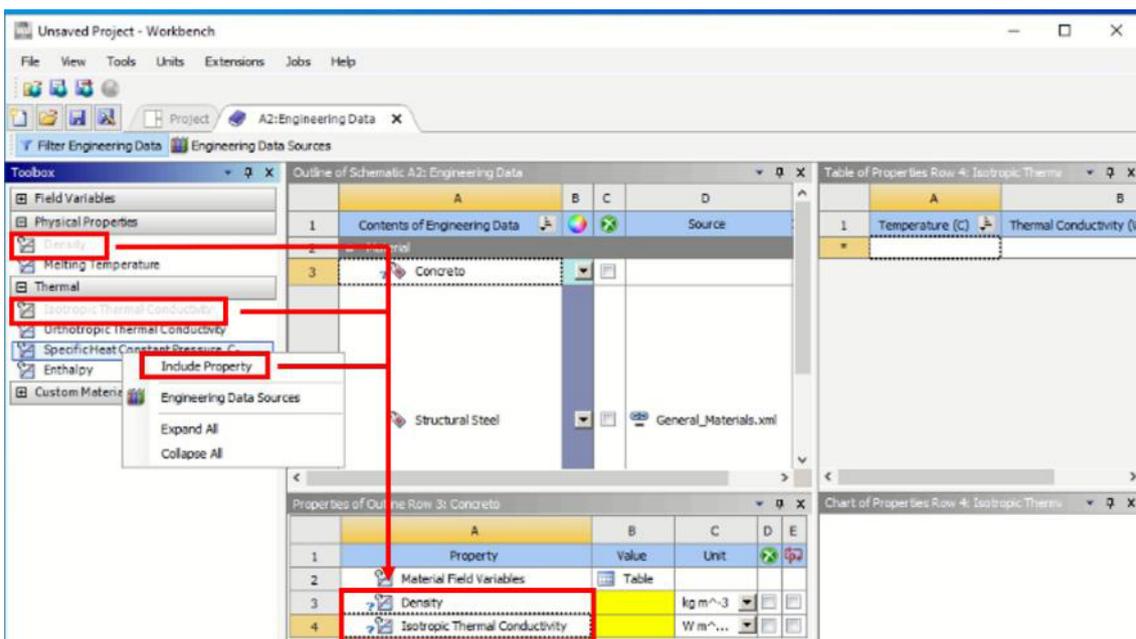
Figura 40 — Criação de materiais



Fonte: o Autor.

Com o material criado, selecione as propriedades necessárias para esta análise na coluna da esquerda, clicando com o botão direito e selecionando a opção *Include Property* (Figura 41). Aqui, serão necessários os valores de massa específica, condutividade térmica e calor específico.

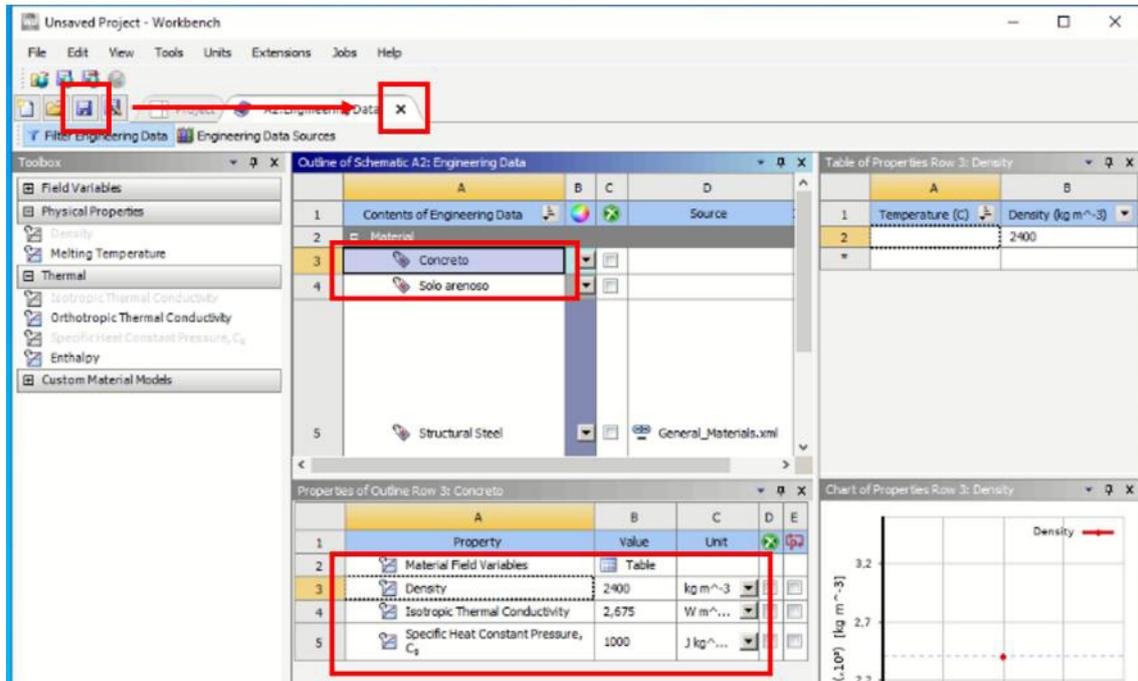
Figura 41 — Inserção das propriedades dos materiais



Fonte: o Autor.

Insira os valores das propriedades nas células em amarelo, coloque a unidade correta, e repita o procedimento para a criação do material do solo, no qual a fundação será assentada. Ao fim do processo, salve o projeto e feche a aba de materiais (Figura 42).

Figura 42 — Fim da criação de materiais

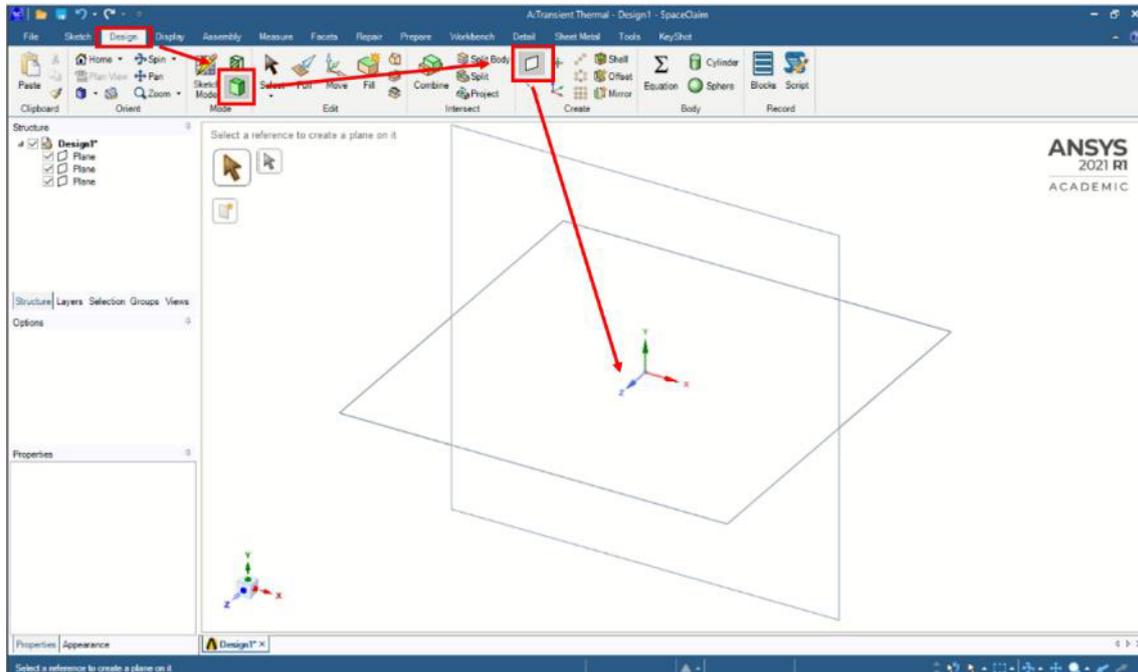


Fonte: o Autor.

3. Desenhando a geometria

De volta à tela inicial, dê um clique duplo em *Geometry*, e o *SpaceClaim* será aberto. Na aba *Design*, clique em *3D Mode*, depois em *Plane*, e no eixo z do sistema de coordenadas do centro da tela. Será criado um plano perpendicular a este eixo (Figura 43).

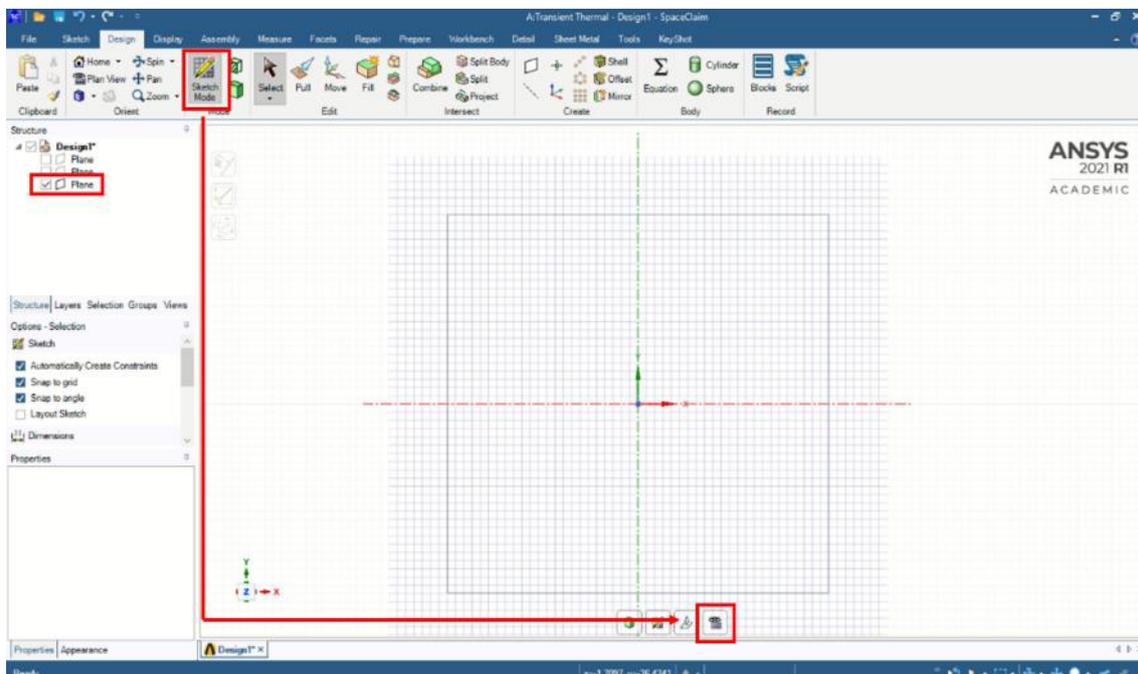
Figura 43 — Criação de plano frontal



Fonte: o Autor.

Em seguida, clique em *Sketch Mode*, e com o plano criado marcado na coluna da esquerda, clique em *Plan View* (Figura 44).

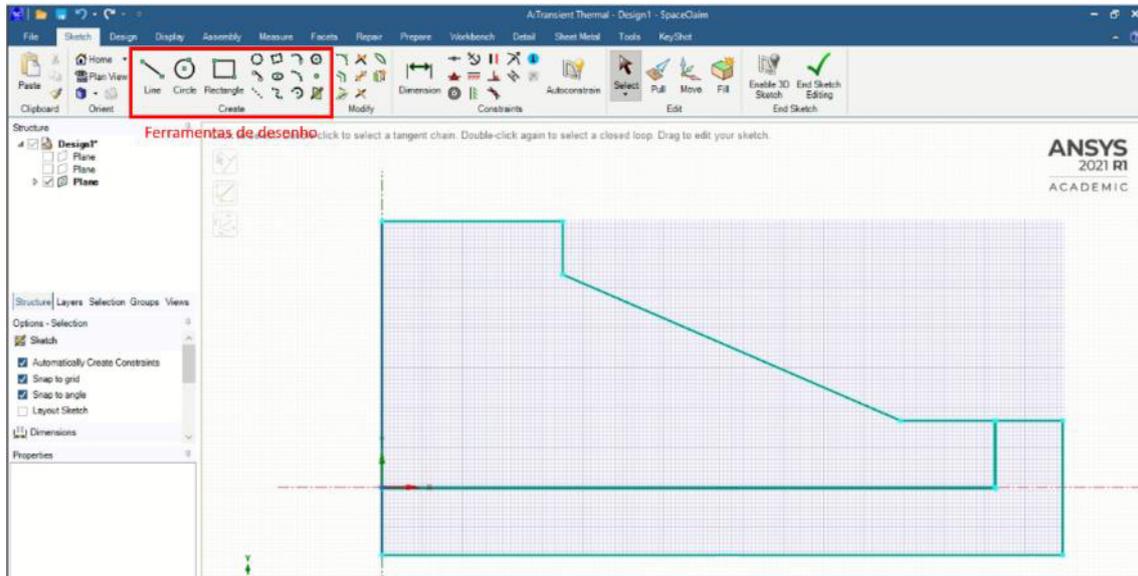
Figura 44 — Modo de desenho



Fonte: o Autor.

Utilizando as ferramentas de desenho da aba Sketch, desenhe a meia seção transversal da fundação e da camada de solo (Figura 45).

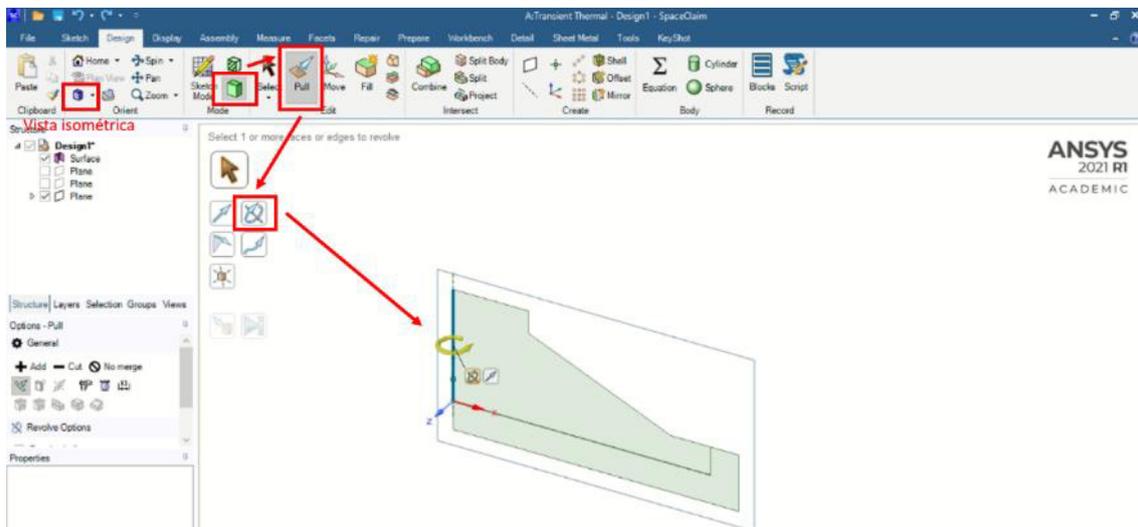
Figura 45 — Desenho da meia seção transversal da fundação



Fonte: o Autor.

Na aba Design, selecione *3D Mode*, coloque o desenho em vista isométrica selecionando *Trimetric* e selecione a opção *Pull*. Com esta ação marcada, selecione a opção *Revolve* (Figura 46). Selecione o eixo onde será feita a revolução para obter o modelo 3D e gire o desenho.

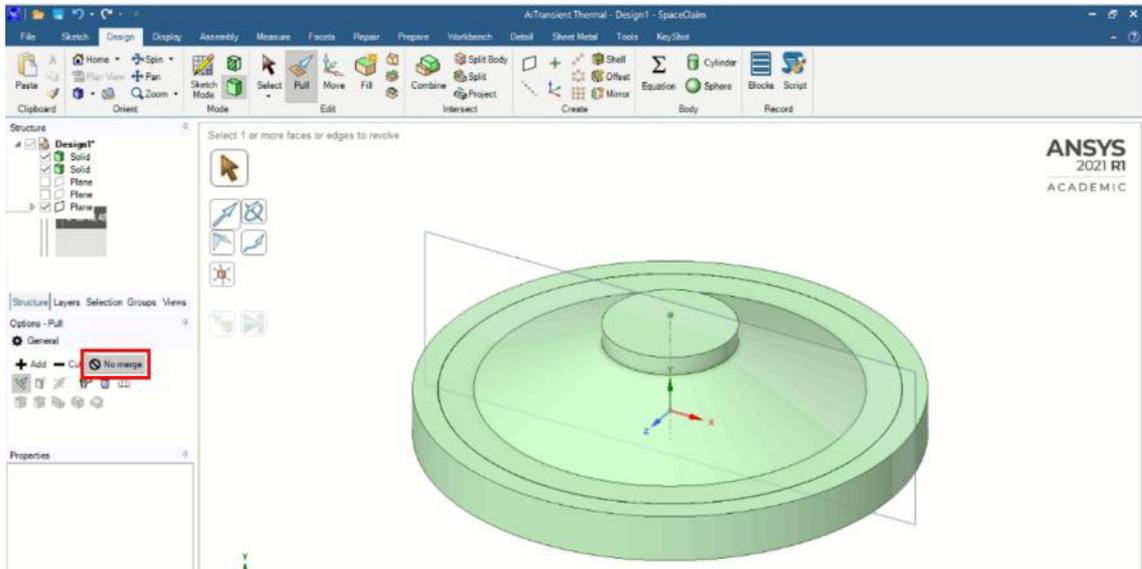
Figura 46 — Revolução da seção da fundação



Fonte: o Autor.

Repita o processo para gerar a massa de solo, mas dessa vez, com a opção *No Merge* ativada (Figura 47).

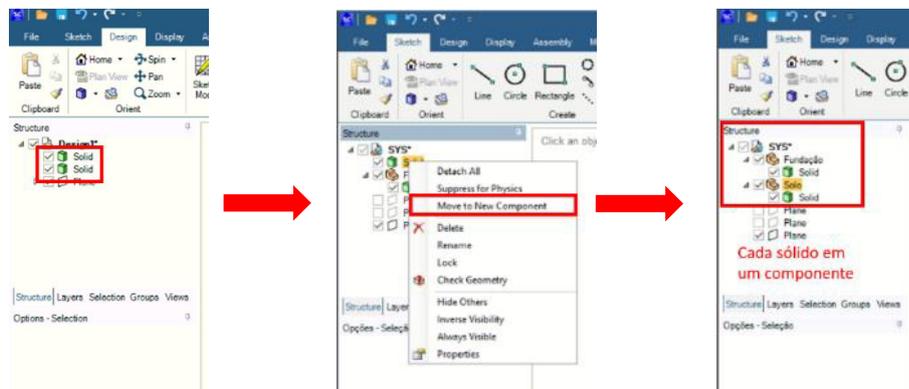
Figura 47 — Geração dos modelos da fundação e do solo



Fonte: o Autor.

Na coluna da esquerda, onde os dois sólidos criados estão simbolizados, clique em cada um e selecione a opção *Move to New Component*, de forma que cada sólido esteja inserido em um componente (Figura 48). Esta etapa é necessária para que as propriedades dos materiais sejam aplicadas de forma correta na configuração do modelo.

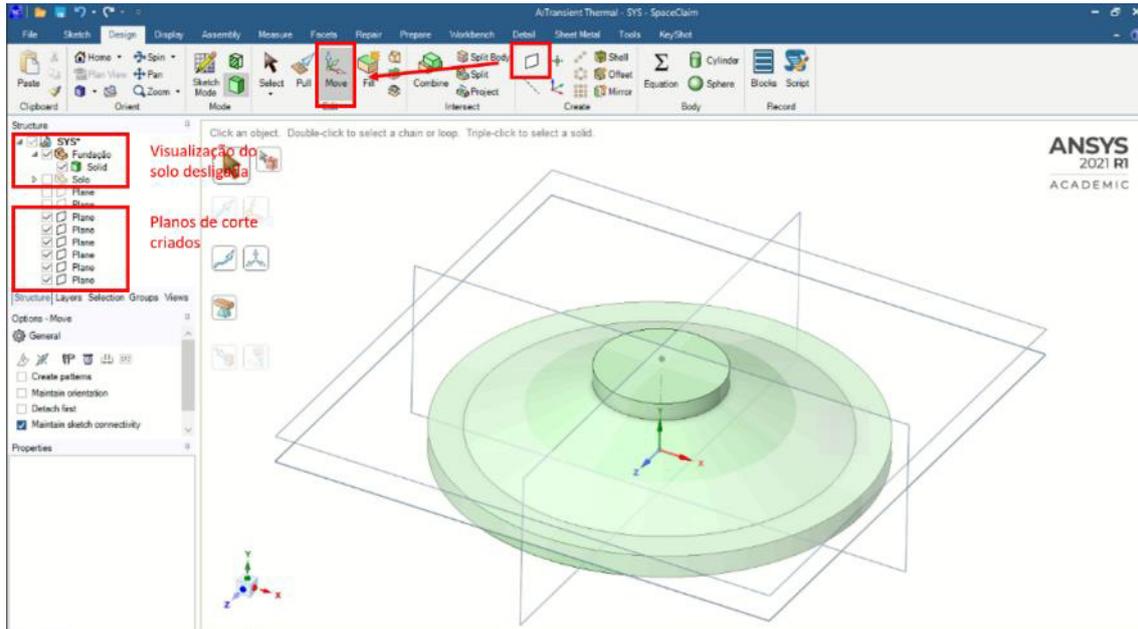
Figura 48 — Criação de componentes para os sólidos



Fonte: o Autor.

Com apenas a visualização da fundação ativada, na aba *Design*, crie planos utilizando as ferramentas *Plane* e *Move*, para criar faces dividindo a estrutura simetricamente (Figura 49).

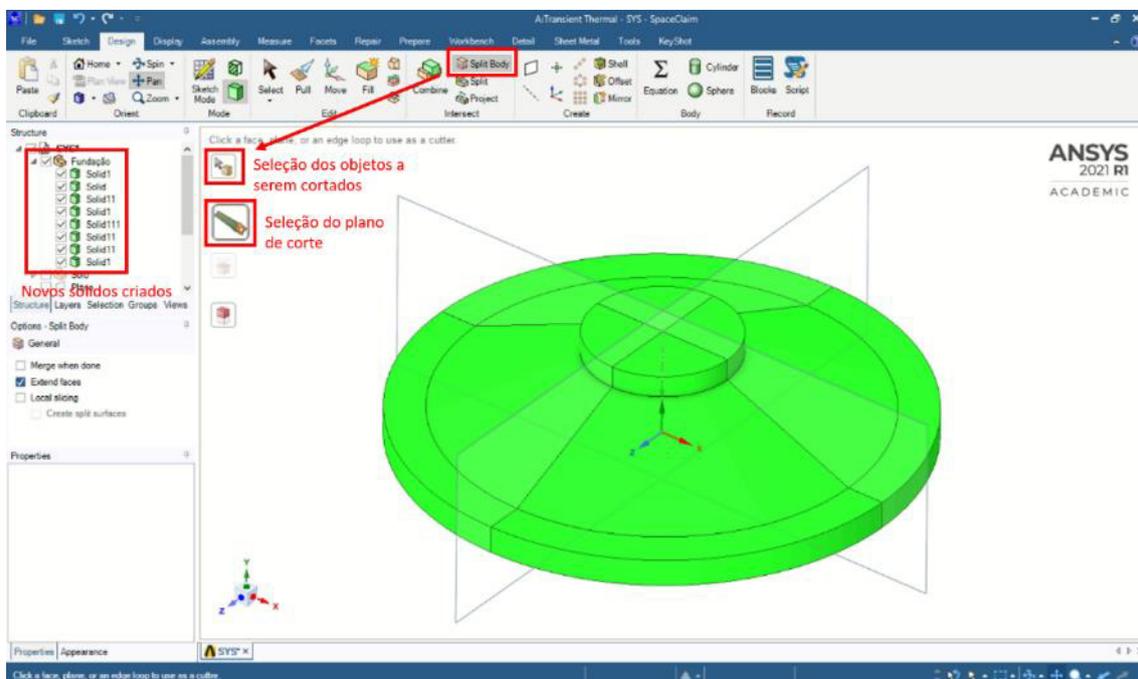
Figura 49 — Criação de planos de referência



Fonte: o Autor.

Então, utilizando a ferramenta *Split Body*, corte a fundação de acordo com os planos criados, transformando a estrutura em um conjunto de vários sólidos menores (Figura 50).

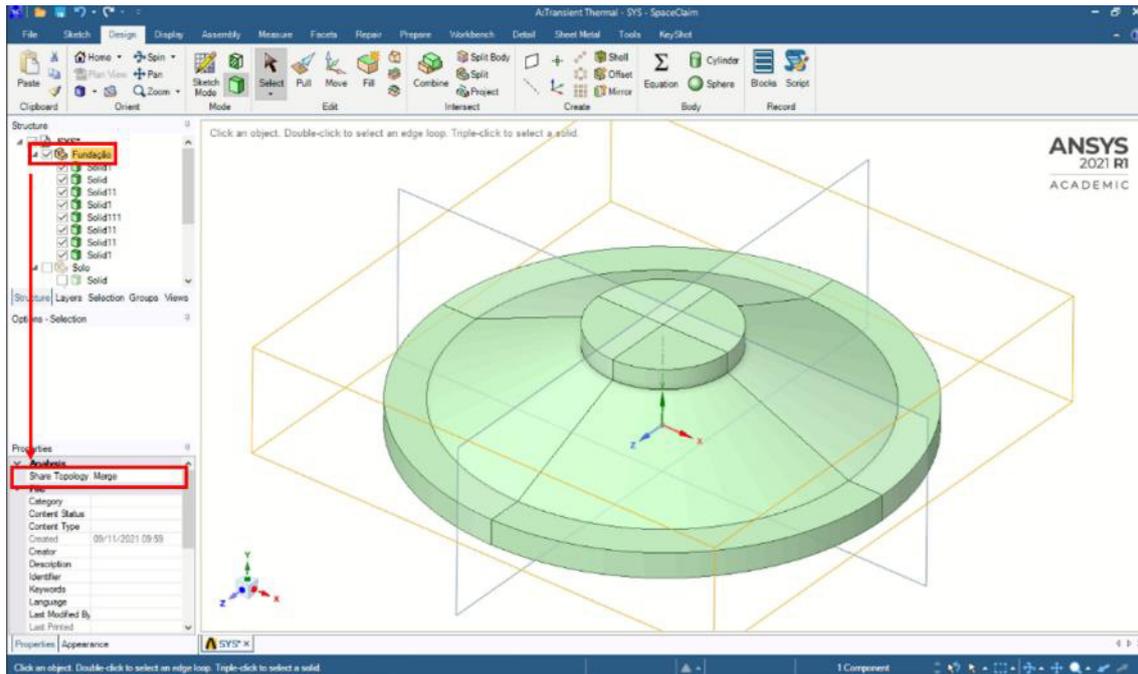
Figura 50 — Divisão da estrutura em sólidos menores



Fonte: o Autor.

Selecione cada elemento, e nas propriedades no canto inferior esquerdo, em *Share Topology*, marque *Merge* (Figura 51).

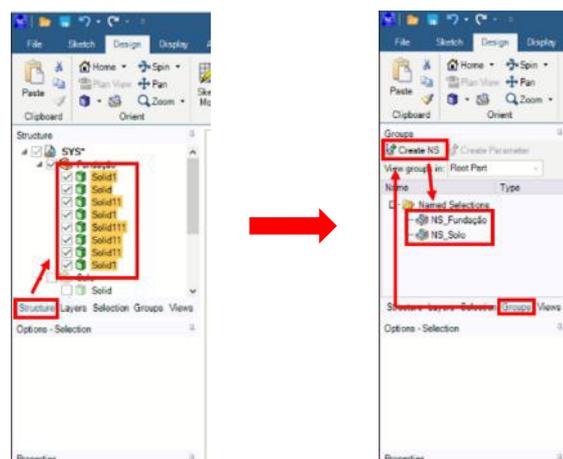
Figura 51 — Fundindo topologias para sólidos do mesmo componente



Fonte: o Autor.

Na aba *Structure* da coluna da esquerda, selecione todos os sólidos correspondentes a um componente, clique na aba *Groups*, e em *Create NS*. Repita o processo para todos os componentes (Figura 52).

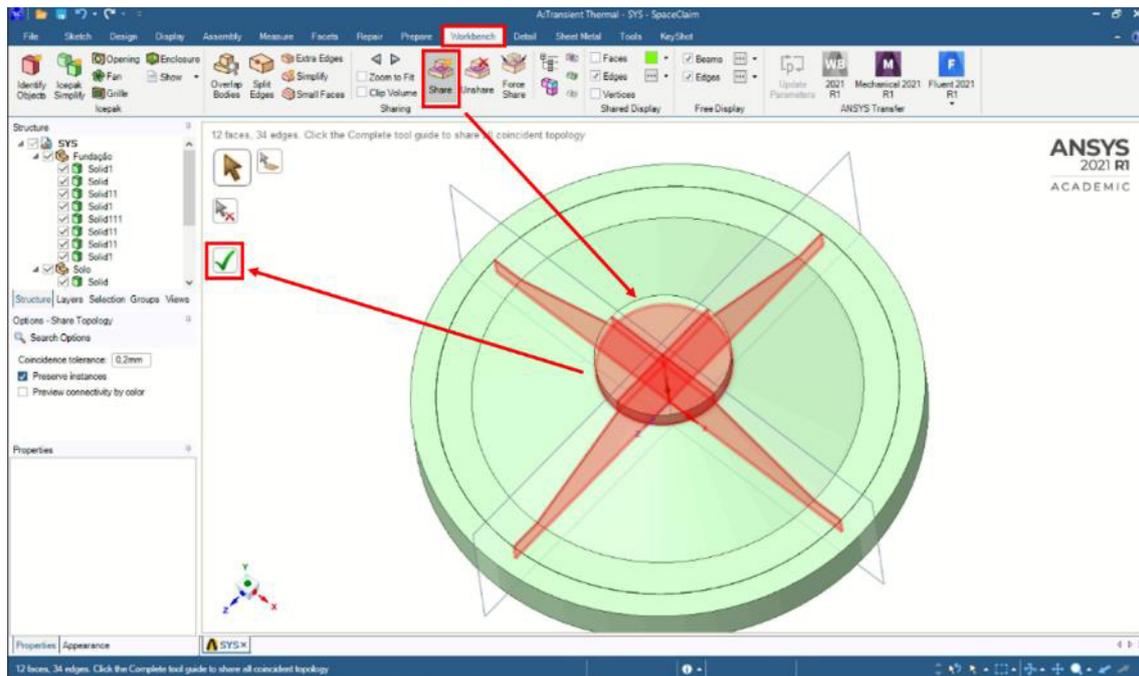
Figura 52 — Criação de Named Selections (NS)



Fonte: o Autor.

Na aba *Workbench*, selecione a opção *Share*, e clique nas faces que unem os blocos superior e inferior da fundação (Figura 53). Após isso, salve o projeto e retorne à área de trabalho do Ansys.

Figura 53 — União das faces comuns aos dois blocos da fundação

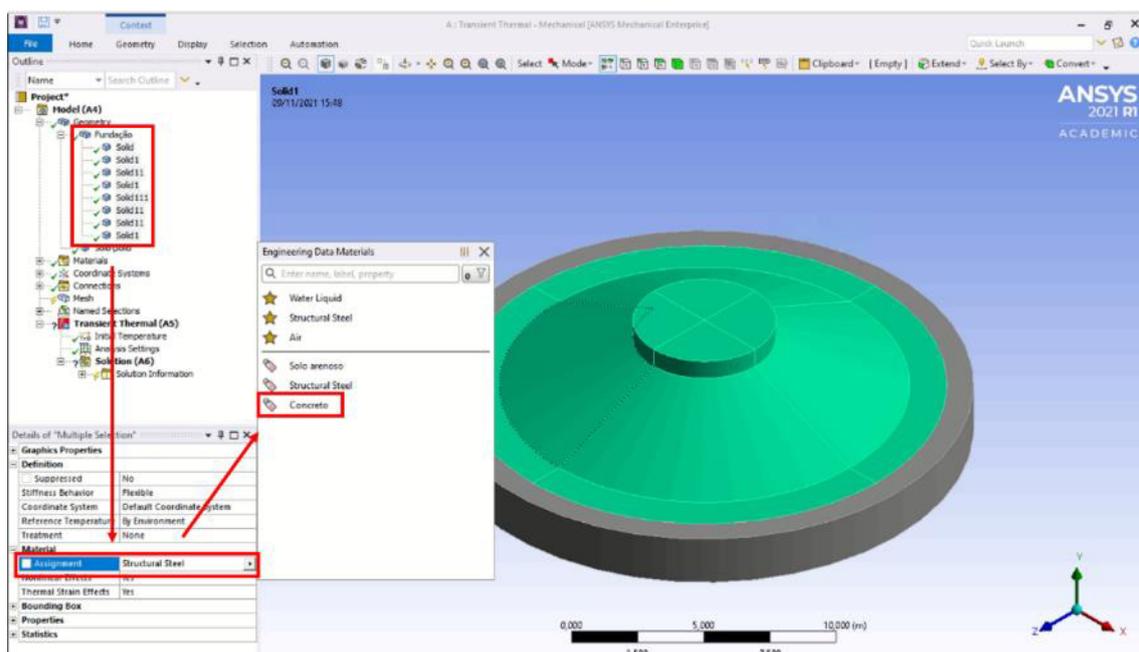


Fonte: o Autor.

3. Configurando o modelo

Na área de trabalho do Ansys, dê um clique duplo em *Model*. Irá se abrir o módulo *Mechanical*. Na coluna da esquerda, expanda a opção *Geometry*, selecione os sólidos da fundação e nas propriedades, na opção *Assignment* selecione Concreto. Repita o procedimento para o solo (Figura 54).

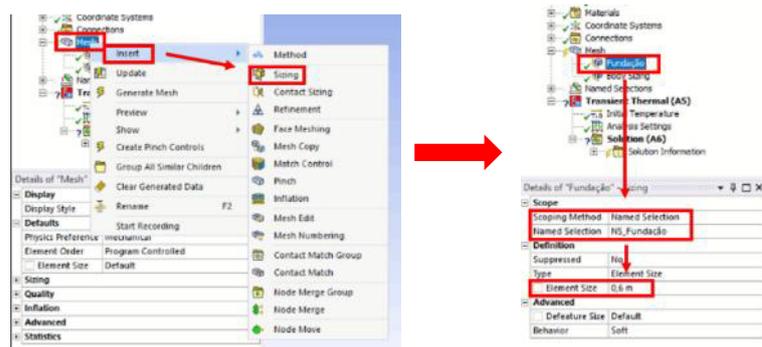
Figura 54 — Vinculação dos materiais aos sólidos



Fonte: o Autor.

Clique com o botão direito em *Mesh*, na opção *Insert* clique em *Sizing*, para criar a malha de elementos finitos. Em *Details*, na parte inferior, selecione o *Scoping Method* como *Named Selection*, e aplique a NS correspondente a cada sólido (Figura 55). Em *Element Size*, determine o tamanho de cada elemento da malha.

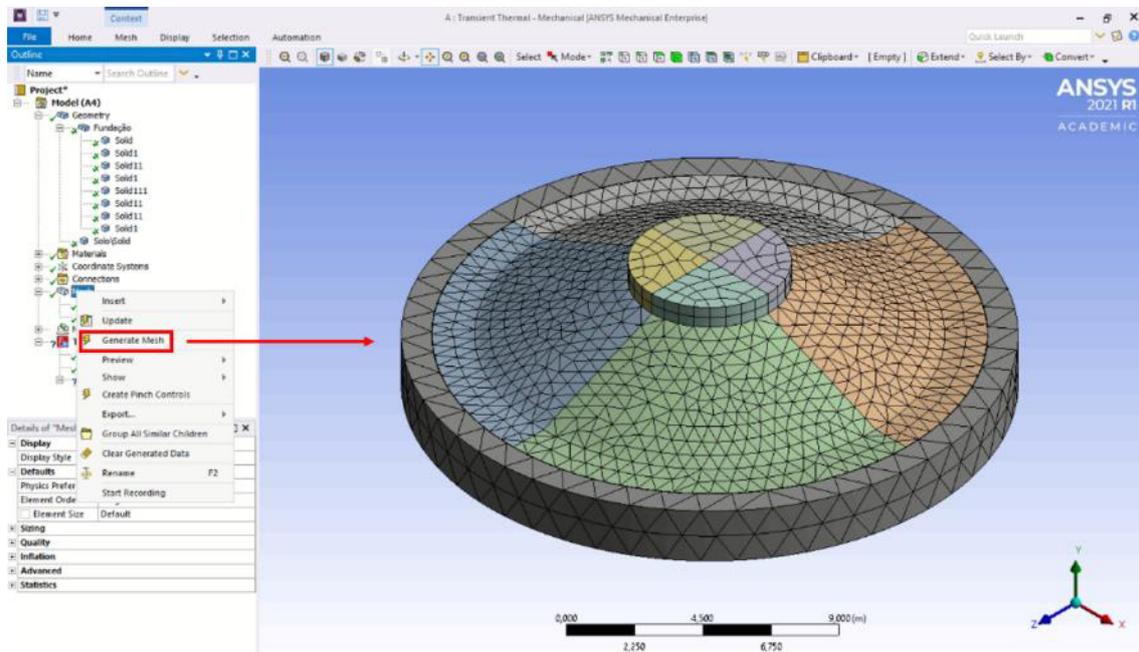
Figura 55 — Criação da malha de elementos finitos



Fonte: o Autor.

Após a definição dos parâmetros da malha, clique com o botão direito em *Mesh* e selecione a opção *Generate Mesh* e a malha de elementos finitos será gerada (Figura 56).

Figura 56 — Malha de elementos finitos gerada

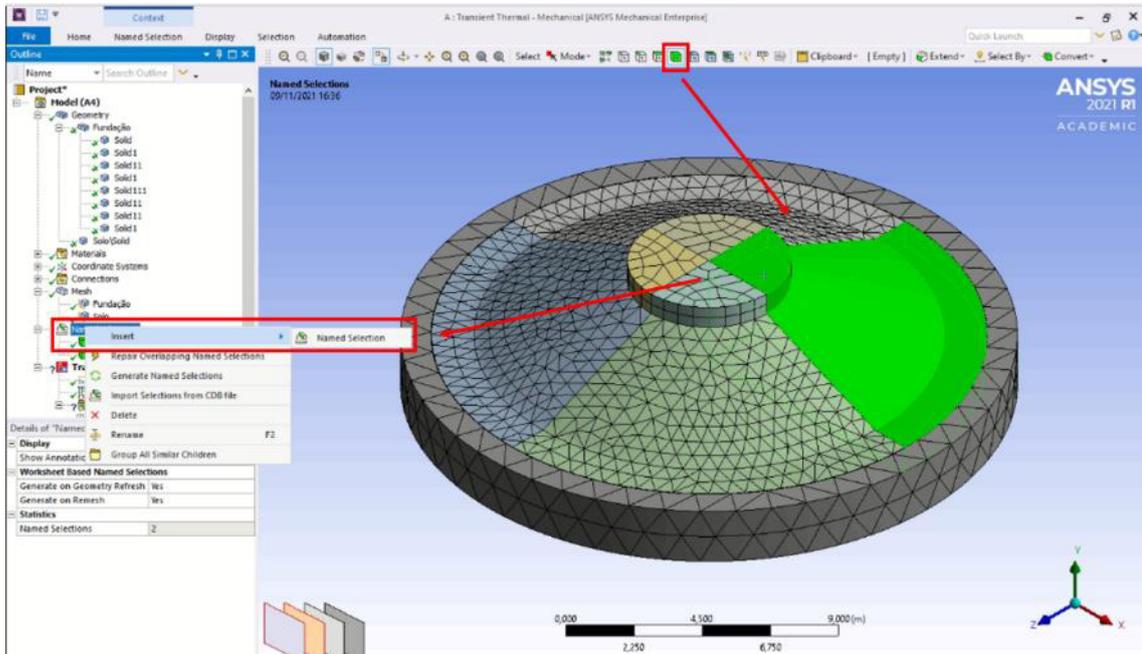


Fonte: o Autor.

Para criar ponto onde os resultados poderão ser visualizados, é preciso criar várias NS. Clicando em *Body*, selecione um quadrante da estrutura, clique com o botão direito em

Named Selection e escolha a opção *Insert* (Figura 57).

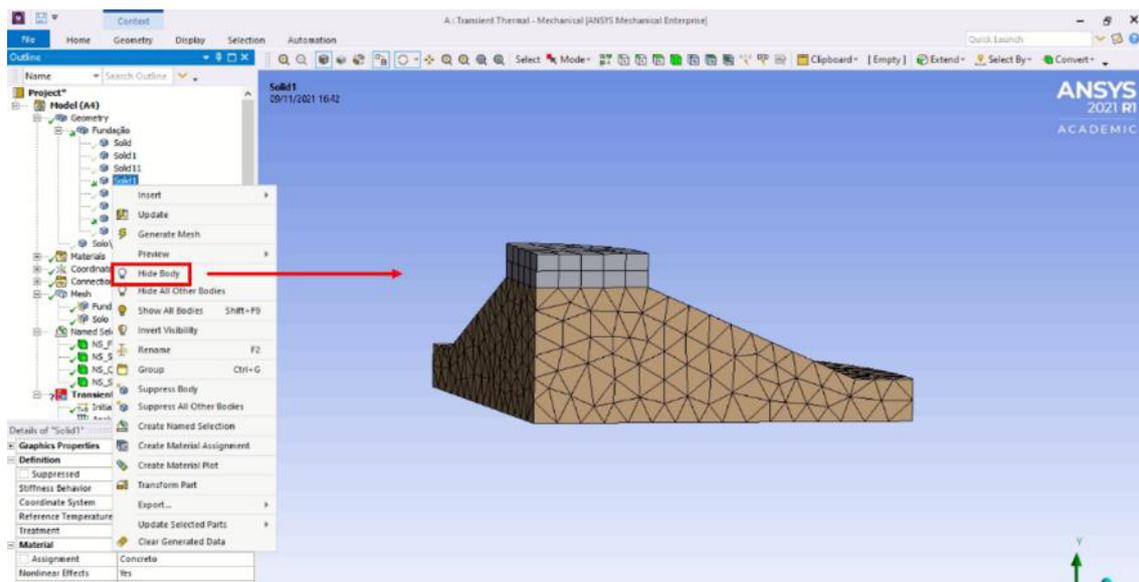
Figura 57 — Criação de *Named Selection* de um quarto da estrutura



Fonte: o Autor.

Em *Geometry*, clique nos sólidos com o botão direito e selecione a opção *Hide Body*, até que fique apenas um quarto da estrutura visível (Figura 58).

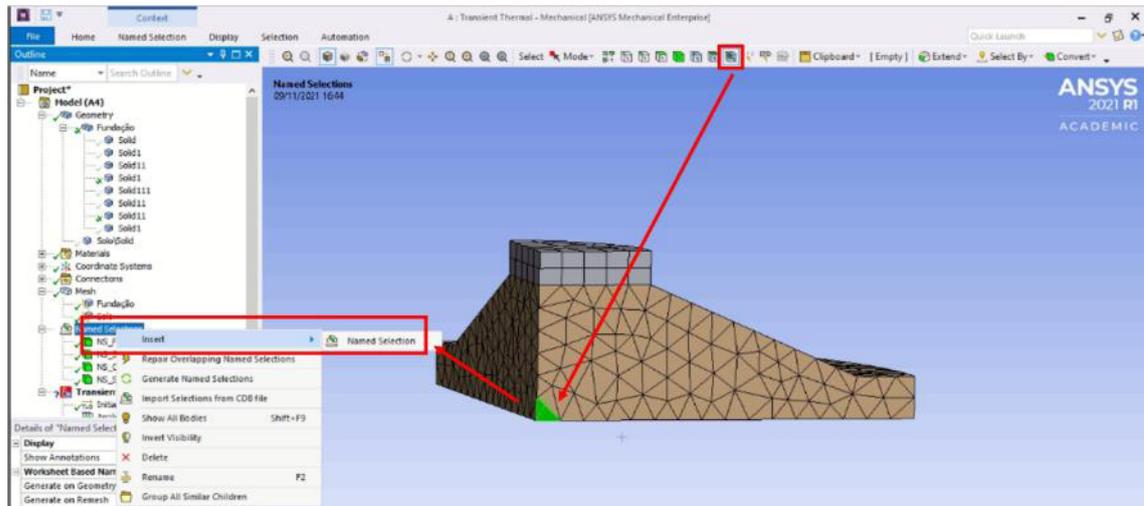
Figura 58 — Deixando apenas um quarto da estrutura visível



Fonte: o Autor.

Em seguida, selecione *Element* e clique em algum elemento de interesse na fundação, e repita o processo de criação de *Named Selection* (Figura 59).

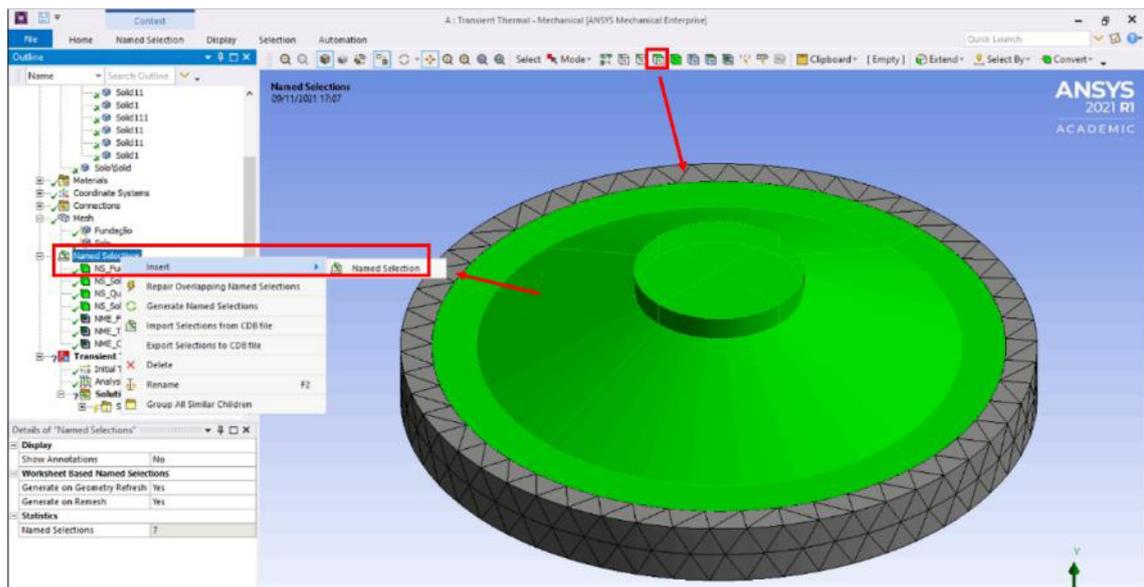
Figura 59 — Criação de um NS de um elemento da malha



Fonte: o Autor.

Por último, deve ser criada uma NS nas faces que estarão expostas ao vento, para isso, selecione *Face*, clique nas faces correspondentes e crie uma *Named Selection* (Figura 60).

Figura 60 — Criação de NS para aplicação de contato com vento



Fonte: o Autor.

4. Inserindo os parâmetros da simulação

Clique em *Initial Temperature* e defina um valor para a temperatura inicial da simulação (Figura 61).

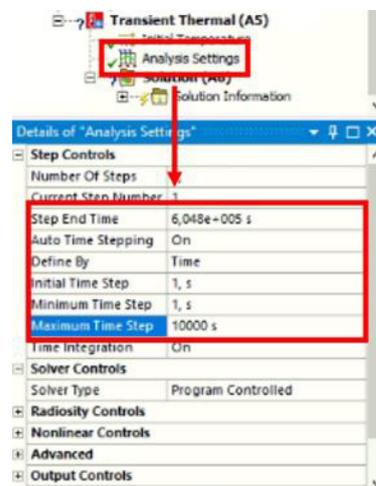
Figura 61 — Definição da temperatura inicial



Fonte: o Autor.

Clique em *Analysis Settings*, e altere o *Step End Time* para o valor de tempo total da simulação, mude o *Auto Time Stepping* para *On*, mude o *Initial Time Stepping* e o *Minimum Time Stepping* para 1s e o *Maximum Time Stepping* para 10000s (Figura 62).

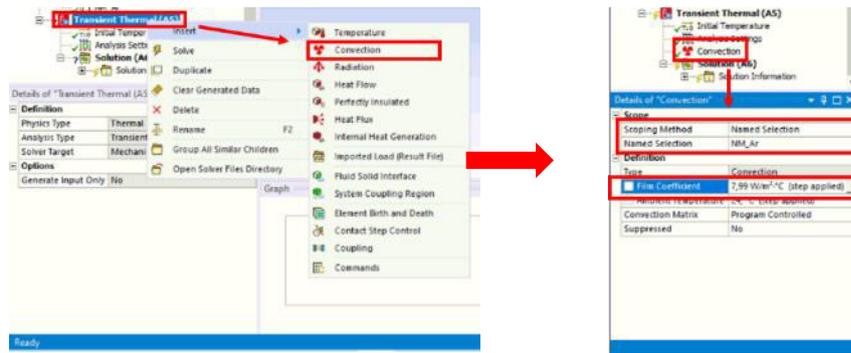
Figura 62 — Definição dos passos da simulação



Fonte: o Autor.

Em *Transient Thermal*, clique com o botão direito e, na aba *Insert*, selecione a opção *Convection*. Em seguida, selecione as faces que estarão em contato com o ar a partir da *Named Selection* criada anteriormente, e adicione o valor do coeficiente de troca de calor convectiva (Figura 63).

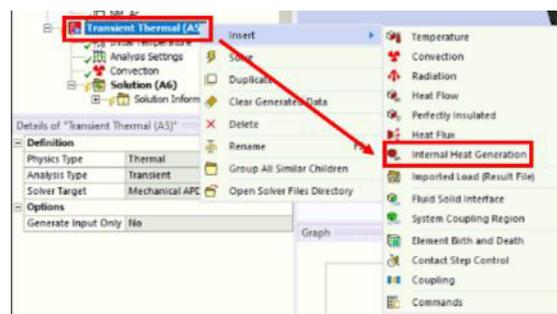
Figura 63 — Criação do parâmetro de convecção com o ar



Fonte: o Autor.

Novamente em *Transient Thermal*, clique com o botão direito e, na aba *Insert*, selecione *Internal Heat Generation* (Figura 64).

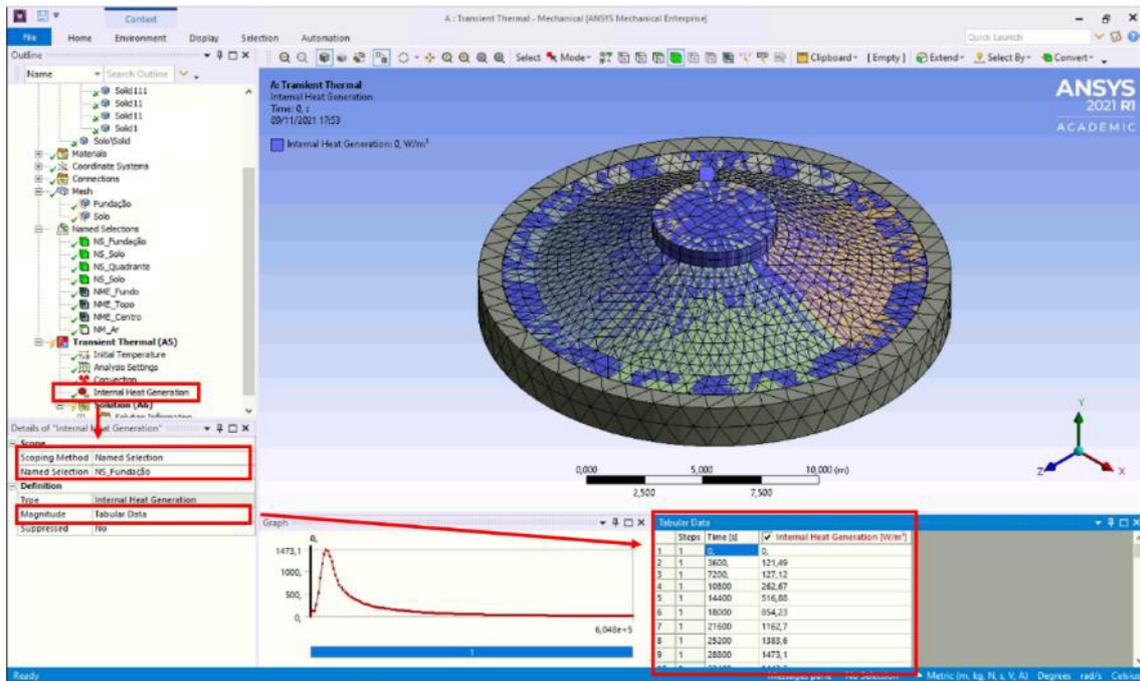
Figura 64 — Criação de condição de aquecimento da estrutura



Fonte: o Autor.

Clicando em *Internal Heat Generation* na coluna da esquerda, altere suas propriedades em *Scoping Method* para *Named Selection*, e selecione a NS que comporta o volume da fundação. Em *Magnitude*, selecione *Tabular Data* e, no espaço inferior da direita, insira os dados de geração de calor da estrutura (Figura 65).

Figura 65 — Inserção dos dados de geração de calor da estrutura

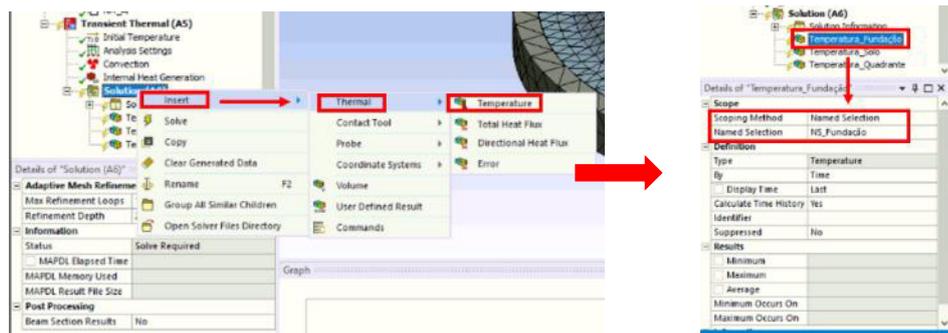


Fonte: o Autor.

4. Realizando a simulação e obtendo resultados

Clicando com o botão direito em *Solution*, e escolhendo as opções *Insert*, *Thermal* e *Temperature*, será gerada uma visualização dos resultados da simulação do ponto de interesse, bastando escolher em seguida a qual NS ela será vinculada (Figura 66).

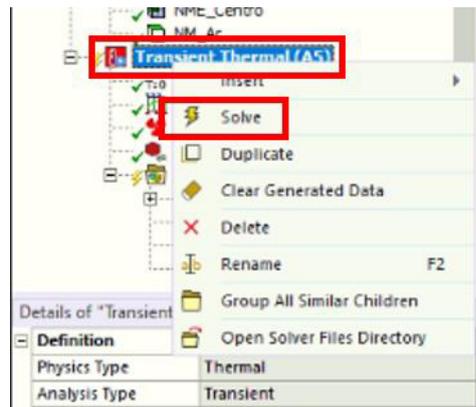
Figura 66 — Criação de visualização de resultados



Fonte: o Autor.

Para iniciar a simulação, clique com o botão direito em *Transient Thermal* e selecione a opção *Solve* (Figura 67).

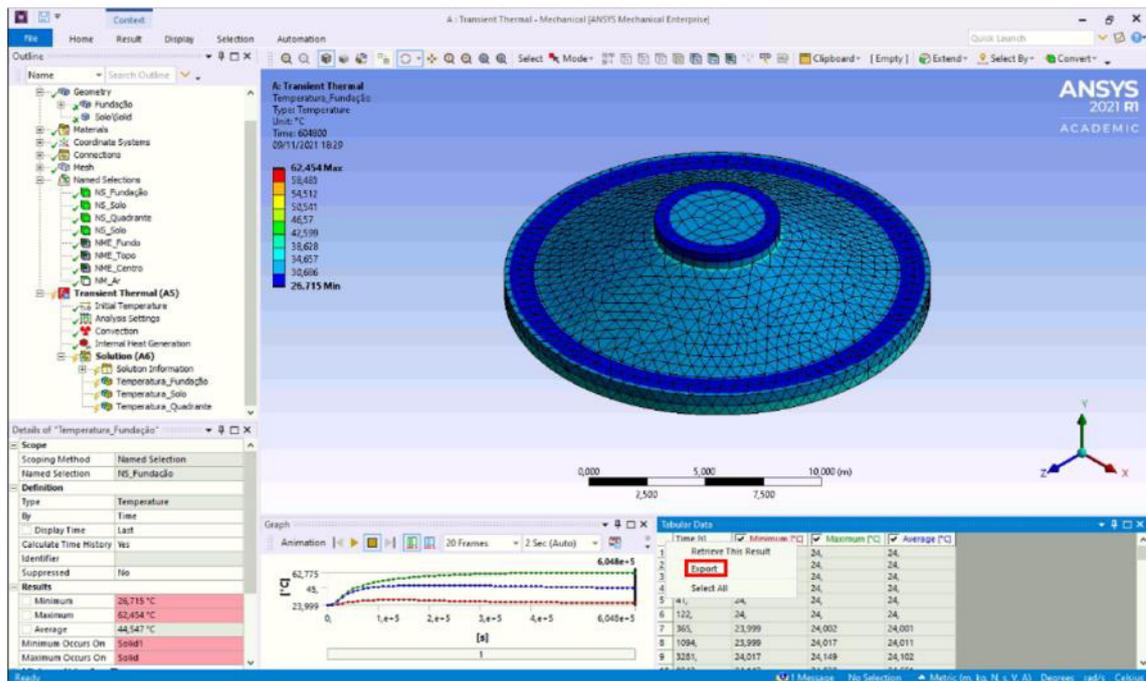
Figura 67 — Iniciando a simulação



Fonte: o Autor.

Após a simulação, os resultados podem ser visualizados nos pontos criados anteriormente, e os dados podem ser exportados para clicando com o botão direito na tabela de valores no canto inferior direito e selecionando a opção *Export* (Figura 68).

Figura 68 — Visualização dos dados e opção de exportação



Fonte: o Autor.