

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS

FELIPE MINKS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO
PARA TANQUES DE ARMAZENAGEM DE CIMENTO ASFÁLTICO
DE PETRÓLEO USANDO SERPENTINAS INTERNAS**

CAXIAS DO SUL

2025

FELIPE MINKS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO PARA
TANQUES DE ARMAZENAGEM DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO
USANDO SERPENTINAS INTERNAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
Mecânica da Universidade de Caxias do Sul,
como requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alexandre
Luciano.

CAXIAS DO SUL

2025

FELIPE MINKS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO PARA
TANQUES DE ARMAZENAGEM DE CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO
USANDO SERPENTINAS INTERNAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano.

Aprovado em 28/11/2025

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexandre Viecelli
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Giovani Dambros Telli
Universidade de Caxias do Sul

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria para concluir mais esta etapa da minha vida. Sem Sua presença e orientação, nada disso seria possível.

À minha esposa, Carla Bianque, por todo amor, paciência e incentivo ao longo dessa jornada. Seu apoio incondicional foi essencial nos momentos de cansaço e incerteza, tornando este resultado também uma conquista sua.

À Margui Engenharia de Equipamentos, pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por todo suporte técnico e estrutural oferecido durante o projeto.

Aos colegas e amigos que contribuíram direta ou indiretamente com ideias, conselhos e companheirismo, tornando o processo mais leve e enriquecedor.

E, por fim, aos professores e principalmente ao orientador Dr. Marcos Alexandre Luciano, por todo o conhecimento compartilhado, pela paciência e pela dedicação ao longo desta caminhada acadêmica.

A todos, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de aquecimento por serpentinas internas para tanques de armazenagem de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), em substituição ao tradicional sistema de Fogo Tubular. Inicialmente, foi realizada uma fundamentação teórica sobre modelagem térmica, transferência de calor em fluidos viscoelásticos e sistemas de aquecimento indireto. Em seguida, o estudo abordou o diagnóstico do sistema atual, destacando limitações como distribuição térmica desigual, risco de superaquecimento do CAP e dificuldades de manutenção. Com base nisso, foi elaborada uma proposta de intervenção utilizando serpentinas internas e fluido térmico. Deste modo, elaborou-se o dimensionamento térmico do aquecedor e da serpentina, seguido da modelagem tridimensional do conjunto e da realização de simulações CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para representar o comportamento térmico do óleo térmico e do CAP. Na sequência, foi construído um protótipo, que passou por testes experimentais para observar o funcionamento do circuito de óleo térmico e registrar o comportamento térmico durante o processo de aquecimento. O trabalho apresenta os resultados das três etapas, considerando o ΔT , isto é, a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do óleo térmico na câmara de combustão, parâmetro utilizado para comparar o desempenho previsto e observado. No dimensionamento térmico, estimou-se um ΔT próximo de 18 °C, na simulação CFD, obteve-se um ΔT em torno de 20 °C e nos testes experimentais, registrou-se um ΔT de aproximadamente 15,7 °C.

Palavras-chave: Cimento Asfáltico Petróleo; Aquecimento indireto; Transferência de calor; Serpentinhas térmica

ABSTRACT

This work presents the development of an internal coil heating system for storage tanks of Petroleum Asphalt Cement (CAP), as a replacement for the traditional Fire Tube system. Initially, a theoretical foundation was carried out addressing thermal modeling, heat transfer in viscoelastic fluids, and indirect heating systems. Next, the study evaluated the current heating method, highlighting limitations such as uneven thermal distribution, risk of CAP overheating, and maintenance difficulties. Based on this assessment, an intervention proposal using internal coils and thermal oil was developed. Thus, the thermal sizing of the heater and the coil was carried out, followed by the three-dimensional modeling of the assembly and the execution of CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations to represent the thermal behavior of the thermal oil and the CAP. Subsequently, a prototype was built and subjected to experimental tests to observe the operation of the thermal oil circuit and record its thermal behavior during the heating process. The work presents the results of the three stages, considering ΔT , that is, the temperature difference between the inlet and outlet of the thermal oil in the combustion chamber, a parameter used to compare the predicted and observed performance. In the thermal design calculations, a ΔT of approximately 18 °C was estimated; in the CFD simulation, a ΔT of around 20 °C was obtained; and in the experimental tests, a ΔT of approximately 15.7 °C was recorded.

Keywords: Petroleum Asphalt Cement; Indirect heating; Heat transfer; Thermal coils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de balanço de energia de uma caldeira com perdas	19
Figura 2 - Evolução do fator de perda e o módulo de armazenamento	21
Figura 3 - Etapas do envelhecimento	23
Figura 4 - Faixas de aplicação dos fluídos	25
Figura 5 - Vista explodida Tanque de CAP Fogo Tubular.....	27
Figura 6 - Vista em corte Tanque de CAP Fogo Tubular.....	28
Figura 7 - Simulação térmica do aquecimento por Fogo Tubular.....	29
Figura 8 - Vista explodida Tanque de CAP serpentinas óleo térmico.....	32
Figura 9 - Vista em corte Tanque de CAP serpentinas óleo térmico	32
Figura 10 - Etapas do processo.....	33
Figura 11 - Modelo 3D do aquecedor de óleo térmico utilizado na simulação CFD	38
Figura 12 - Modelo 3D do tanque de CAP utilizado na simulação CFD	39
Figura 13 - Evolução da temperatura na saída do óleo térmico em função das interações	41
Figura 14 - Distribuição de temperatura do óleo térmico no aquecedor	41
Figura 15 - Distribuição de temperatura dos gases na câmara de combustão	42
Figura 16 – Monitoramento temperatura entrada e saída de óleo térmico tanque de CAP.....	43
Figura 17 - Monitoramento da temperatura do CAP	44
Figura 18 - Distribuição de temperatura no volume da serpentina de óleo térmico.....	45
Figura 19 - Distribuição de temperatura no CAP em corte transversal do tanque	45
Figura 20 – Carregamento do óleo térmico	46
Figura 21 – Gráfico da relação temperatura óleo térmico	48
Figura 22 – Monitoramento das temperaturas de entrada e saída do óleo térmico	48
Figura 23 – Imagem térmica do aquecedor e serpentina no interior do tanque de CAP.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Viscosidade Brookfield	21
Tabela 2 – Parâmetros de entrada.....	35
Tabela 3 – Cálculos potências destinadas a cada seção.....	36
Tabela 4 – Cálculos variação de temperatura em cada seção.....	37
Tabela 5 – Cálculo tempo necessário de aquecimento	37
Tabela 6 – Comparação resultados dos metodos de cálculo	49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Área da superfície de troca térmica (m ²)
α	Difusividade térmica (m ² /s)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAP	Cimento Asfáltico Petróleo
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
C_p	Capacidade calorífica específica (J/kg·K)
C	Teor de carbono
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ΔT	Diferença de temperatura (K)
Δh	Variação de entalpia (kJ/kg)
Δh_{CO_2}	Variação de entalpia do dióxido de carbono (kJ/kg)
Δh_{SO_2}	Variação de entalpia do dióxido de enxofre (kJ/kg)
Δh_{N_2}	Variação de entalpia do nitrogênio (kJ/kg)
Δh_{ar}	Variação de entalpia do ar (kJ/kg)
dQ	Quantidade de calor transferido (kJ)
E'	Módulo de armazenamento (viscoelasticidade) (Pa)
e	Coefficiente de excesso de ar
ε	Emissividade da superfície
η	Eficiência térmica ou fator de perda
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção (W/m ² ·K)
h_q	Coefficiente de convecção do fluido quente (W/m ² ·K)
h_f	Coefficiente de convecção do fluido frio (W/m ² ·K)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
k	Condutividade térmica (W/m·K)
m_{ar}	Massa de ar (estequiométrica) (kg)
n	Teor de nitrogênio
p	Pressão (Pa)
q_c	Taxa de calor por convecção (W)
q_k	Taxa de calor por condução ou radiação (W)
Q_{abs}	Calor absorvido pelo fluido térmico (kW·h)
Q_{in}	Calor fornecido à caldeira (kW)
ρ	Densidade do material (kg/m ³)

s	Teor de enxofre
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)
T	Temperatura absoluta (K)
T1	Temperatura da superfície quente (K)
T2	Temperatura da superfície fria (K)
U	Coeficiente global de troca térmica ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
CHT	<i>Conjugate Heat Transfer</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier–Stokes</i>
VG	<i>Viscosity Grade</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral.....	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	MODELAGEM MATEMÁTICA PARA TROCADORES DE CALOR	16
2.1.1	Modelos matemáticos de transferência de calor	16
2.1.2	Cálculo da eficiência de sistemas de aquecimento	18
2.2	TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FLUIDOS VISCOSOS	20
2.2.1	Comportamento térmico de materiais viscoelásticos	20
2.2.2	Difusividade térmica e capacidade calorífica do CAP	21
2.2.3	Efeitos do aquecimento excessivo: degradação, oxidação, endurecimento	22
2.3	SISTEMAS DE AQUECIMENTO INDIRETO COM SERPENTINAS	23
2.3.1	Princípios de funcionamento das serpentinas térmicas	23
2.3.2	Escolha e propriedades do fluido térmico	24
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	CENÁRIO ATUAL.....	26
3.1.1	Caracterização do sistema de aquecimento atual.....	26
3.1.2	Coleta de dados e contexto técnico-operacional	28
3.1.3	Pontos fortes do sistema atual	30
3.1.4	Limitações técnicas e operacionais do sistema Fogo Tubular	30
3.2	PROPOSTA PRELIMINAR DE INTERVENÇÃO: SISTEMA DE AQUECIMENTO COM SERPENTINAS INTERNAS	31
3.2.1	Execução da Intervenção: Recursos, métodos e ferramentas utilizados	33
3.2.2	Etapas do processo de desenvolvimento do protótipo	33
4	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	35
4.1	DIMENSIONAMENTO TÉRMICO.....	35
4.1.1	Parâmetros de entrada e propriedades dos materiais.....	35
4.1.2	Variação de temperatura do óleo térmico	36
4.1.3	Tempo teórico aquecimento CAP	37
4.2	SIMULAÇÃO CFD.....	38

4.2.1	Modelos utilizados na simulação	38
4.2.2	Condições de contorno	39
4.2.3	Resultados simulação CFD na câmara de combustão	40
4.2.4	Resultados simulação CFD no tanque de CAP	42
4.3	TESTES DO PROTOTIPO	46
4.3.1	Metodologia de preparação para os testes	46
4.3.2	Resultados obtidos nos testes	47
4.3.3	Análise dos resultados obtidos	49
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
	APÊNDICE A	55
	Modelos utilizados na simulação	55
	Escopo e estratégia de simulação	56
	Metodologia de modelagem	56
	Criação da malha	57
	Seleção do tipo de elementos	57
	Refinamento localizado da malha	57
	Critérios de qualidade da malha	59

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária é fundamental para o desenvolvimento econômico e social de um país, especialmente no Brasil, onde as rodovias são a principal via de transporte de mercadorias e passageiros (Valderrama, 2020, p. 10). A qualidade dessas vias está intrinsecamente ligada aos materiais utilizados na pavimentação, destacando-se o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) como o principal ligante nas misturas asfálticas. O desempenho das rodovias depende diretamente da qualidade do CAP, sendo essencial garantir seu armazenamento e aquecimento adequados para preservar suas propriedades físico-químicas (Rohde, 2007, p 31).

A armazenagem de CAP utilizando o método de aquecimento por meio do sistema Fogo Tubular, consiste na aplicação de calor direto em uma câmara de combustão por meio de um queimador. Embora seja um projeto consolidado, apresenta problemas associados à aplicação do calor direto na câmara de combustão, resultando em superaquecimento localizado. A elevação da temperatura além dos limites recomendados provoca mudanças significativas na estrutura do CAP, incluindo aumento da rigidez e perda de suas características viscoelásticas. Além disso, há um maior risco de oxidação e formação de compostos voláteis, reduzindo a vida útil do material e comprometendo a qualidade do pavimento (Pizzorno, 2010, p 31).

Diante desses desafios, é essencial adotar soluções tecnológicas que minimizem os impactos do superaquecimento e garantam a preservação das propriedades do CAP. Em resposta a essas limitações, propõe-se a substituição do sistema de fogo tubular por serpentinas internas para o aquecimento do CAP. Este método envolve a circulação de óleo térmico nas serpentinas metálicas instaladas internamente nos tanques de armazenamento. Essa abordagem permite uma distribuição mais uniforme do calor, reduzindo o risco de superaquecimento localizado e preservando as propriedades do CAP. Além disso, a utilização de serpentinas internas facilita o controle da temperatura, alinhando-se às diretrizes estabelecidas pela Norma DNIT 031/2024 – Pavimentação – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço, que enfatiza a importância de condições adequadas de armazenamento e manuseio do CAP para garantir a qualidade das misturas asfálticas.

A implementação de serpentinas internas não apenas garante a conformidade com as exigências normativas, mas também se torna um diferencial mercadológico. Além de assegurar o atendimento às normas vigentes, a modernização do sistema de aquecimento permite oferecer soluções mais eficientes e alinhadas às demandas de sustentabilidade e longevidade na construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

A Margui Engenharia de Equipamentos, consolidada na área de produção de usinas de asfalto há 14 anos, situada em Vale Real – RS é uma empresa especializada no desenvolvimento e fabricação de soluções tecnológicas para o setor de construção civil, com ênfase em equipamentos de usinas de asfalto e tanques de armazenagem. Ao longo de sua trajetória, a empresa se firmou como referência pela qualidade e inovação de seus produtos, sempre buscando atender às demandas do mercado e oferecendo soluções que proporcionam alta performance e sustentabilidade.

Atualmente, são fabricados em média 4 unidades de tanques de armazenagem de CAP por mês, com um custo unitário de R\$ 200 mil, o que resulta em uma receita anual de R\$ 9,6 milhões provenientes dessas unidades, representando cerca de 9% do faturamento anual da empresa, que é de R\$ 107 milhões.

O sistema de aquecimento por Fogo Tubular possui limitações na manutenção, pois qualquer falha exige a substituição completa do sistema, gerando custos elevados e tempo de inatividade. O acesso restrito à câmara de combustão dificulta inspeções e reparos preventivos. Com a adoção do sistema de serpentinas internas, uma câmara de combustão maior permite acesso fácil para manutenções, tornando o processo mais eficiente e seguro. Reduzindo o tempo de intervenções corretivas, prolonga a vida útil dos equipamentos e diminui os custos de manutenção.

O uso de serpentinas internas proporciona um processo mais seguro e ambientalmente adequado, reduzindo riscos de superaquecimento, minimizando emissões associadas à degradação térmica do CAP e oferecendo maior controle térmico. Dessa forma, o sistema contribui para um funcionamento mais eficiente e sustentável.

Embora o sistema de serpentinas internas possa demandar mais tempo para aquecer o CAP em comparação ao sistema de Fogo Tubular, oferece uma distribuição de calor mais uniforme e controlada. Resultando na preservação das propriedades físico-químicas, prevenindo o superaquecimento e os danos que podem comprometer a qualidade do CAP. Com esse processo mais gradual e preciso, há uma maior consistência nas propriedades do material, aumentando sua vida útil e, conseqüentemente, a durabilidade das pavimentações. Além disso, o sistema contribui para a otimização do desempenho dos equipamentos e reduz a necessidade de manutenções corretivas, o que leva a uma redução nos custos operacionais a longo prazo, assegurando maior confiabilidade no processo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de aquecimento por serpentinas internas para tanques de armazenagem de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), com o objetivo de garantir uma distribuição térmica uniforme.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) avaliar tecnicamente o produto atual;
- b) projetar um sistema de aquecimento por serpentinas internas, considerando critérios de eficiência térmica e distribuição uniforme do calor;
- c) desenvolver o dimensionamento térmico e analítico;
- d) análise CFD do sistema de aquecimento do tanque de CAP;
- e) testar um protótipo do sistema de aquecimento, validando a eficiência em condições reais de operação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda três tópicos fundamentais no campo da engenharia térmica: a modelagem matemática para trocadores de calor, a transferência de calor em fluidos viscosos, como o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), e os sistemas de aquecimento indireto com serpentinas.

2.1 MODELAGEM MATEMÁTICA PARA TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são amplamente utilizados em várias áreas da engenharia. Esses dispositivos são essenciais em aplicações como sistemas de aquecimento, condicionamento de ar, recuperação de calor. No projeto de trocadores de calor, a modelagem matemática permite a análise do desempenho térmico do sistema, possibilitando a previsão do comportamento do trocador sob diferentes condições de operação. A aplicação de equações diferenciais que descrevem os mecanismos de condução, convecção e radiação, facilita o dimensionamento do trocador, considerando fatores como a área de troca térmica, a taxa de fluxo de calor e a eficiência do sistema. Além disso, ela é essencial para adaptar o projeto às condições específicas de operação, garantindo que o trocador de calor funcione de forma eficiente e segura, maximizando seu desempenho em diversos cenários (Incropera 2007, p 424).

2.1.1 Modelos matemáticos de transferência de calor

A transferência de calor em trocadores de calor pode ser descrita matematicamente de várias formas, dependendo das características do processo e dos fluidos envolvidos. De acordo com Bicca (2006 p. 11), a equação básica para determinar a taxa de transferência de calor em um trocador de calor é dada pela Equação 1:

$$dQ = U \cdot dA \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde dQ é a quantidade de calor transferido (W), U é o coeficiente global de troca térmica ($W/m^2.K$), dA é a área de superfície de troca de calor (m^2) e ΔT a diferença de temperatura entre os fluídos (K).

A condução é uma das principais maneiras de transferência de calor, de acordo com Incropera (2007, p. 3) ela é um processo em que o calor flui de uma região de maior temperatura para uma região de menor temperatura dentro de um meio, seja ele sólido, líquido ou gasoso. Esse processo ocorre através do contato físico direto entre os corpos com diferentes

temperaturas, o que permite a transferência de calor por meio da agitação das moléculas. Em sistemas mais complexos, como líquidos e gases, a condução também desempenha um papel importante, sendo frequentemente associada a outros mecanismos de transferência de calor. A Equação 2 representa a condução.

$$q_k = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Onde k é a condutividade térmica do material (W/m.k), A é a área da seção transversal através da qual o calor está sendo transferido (m^2), dT/dx representa o gradiente de temperatura na seção.

Segundo Incropera (2007, p. 6), a radiação térmica é um processo no qual o calor é transferido de um corpo a alta temperatura para um corpo a temperatura mais baixa, mesmo quando os corpos estão separados no espaço. Essa forma de transferência de calor, chamada calor radiante, não necessita de um meio material. Nos sistemas industriais, como trocadores de calor, o calor radiante possui grande importância. Todos os corpos que possuem temperatura superior ao zero absoluto emitem radiação, com intensidade variável dependendo da composição do corpo. A radiação de corpos negros, por exemplo, é caracterizada pela quantidade de calor emitido por unidade de tempo, dada pela Equação 3 de Stefan-Boltzmann.

$$q_k = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

No qual ϵ é a emissividade da superfície, σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), A é a área da superfície (m^2), T_1 e T_2 são as temperaturas absolutas das superfícies (K).

De acordo com Incropera (2007, p. 5), a convecção é um processo de transporte de energia que envolve a combinação de condução de calor e movimento de um fluido. Esse mecanismo é fundamental na transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluido, sendo caracterizado pela movimentação das partículas do fluido em resposta à diferença de temperatura. A convecção pode ser classificada em dois tipos: convecção livre, onde o fluido se move devido a diferenças naturais de temperatura, e convecção forçada, onde o movimento do fluido é induzido por meios externos, como bombas ou ventiladores. O modelo matemático para a transferência de calor por convecção é descrito pela Lei de Newton para convecção, apresentado na Equação 4.

$$q_c = h_c \cdot A \cdot \Delta T \quad (4)$$

Onde hc é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$), A é a área da superfície de troca térmica (m^2) e ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido (K).

2.1.2 Cálculo da eficiência de sistemas de aquecimento

Os parâmetros de desempenho de uma caldeira, são reduzidos ao longo do tempo devido a várias razões, como combustão incompleta, transferência de calor deficiente, manutenção inadequada, operação incorreta e baixa qualidade do combustível. Portanto, a avaliação dos balanços de energia (perda de calor) e de massa (quantidade de ar de combustão) é necessária para determinar a eficiência (Mehdizadeh; Alishah; Astani, 2016, p. 55).

Segundo Vakkilainen e Ahtila (2011, p.58), caldeiras a óleo Diesel podem atingir entre 90 e 94% de eficiência. A eficiência é uma medida da qualidade do processo e do equipamento utilizado para transferir o calor de combustão para o óleo térmico.

De acordo com Senger (2015, p.33), a eficiência de uma caldeira pode ser calculada através do método direto ou indireto. O método direto pode ser definido como a razão entre o calor útil transferido para o óleo e o total de energia térmica fornecida à caldeira, descrito na Equação 5.

$$\eta = \frac{Q_{abs}}{Q_{in}} \quad (5)$$

Onde Q_{abs} é o calor absorvido pelo óleo térmico e Q_{in} é a quantidade de calor fornecida a caldeira.

Para Senger (2015, p.34), o método em questão possui a vantagem de permitir um cálculo mais rápido, porém, devido às variações temporárias que podem ocorrer na vazão mássica, sua confiabilidade pode ser comprometida.

De acordo com Pinto e Santana (2020, p.170), enquanto o método direto avalia a eficiência com base nas medições de calor de entrada e saída, o método indireto vai além ao incluir a segunda lei da termodinâmica. Isso possibilita uma análise mais detalhada das perdas no gerador de vapor, permitindo uma avaliação mais precisa da eficiência da caldeira, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama de balanço de energia de uma caldeira com perdas



Fonte: Adaptado de Eletrobrás (2005, p.15)

A Figura 1 ilustra a distribuição da energia em uma caldeira, com perdas nos gases de exaustão (18-22%), radiação e convecção (1-4%), e descarga de fundo (1-3%). A maior parte da energia (71-80%) é convertida em calor transportado pelo óleo térmico. As perdas distribuídas no sistema variam entre 5% e 15%. A eficiência global do sistema é de 56% a 75%.

Segundo Mehdizadeh *et al.* (2016, p. 56), o calor liberado pela caldeira através dos gases de exaustão, geralmente, é a maior entre as perdas térmicas em caldeiras que utilizam combustível queimado. A análise da temperatura dos gases de exaustão pode ser utilizada para calcular a eficiência.

Senger (2015, p.35), cita que as perdas de calor pela chaminé constituem a maior parcela das perdas em uma caldeira, conforme a Equação 6.

$$q_{gs} = \frac{44c}{12} \cdot \Delta h_{CO_2} + 2 \cdot s \cdot \Delta h_{SO_2} + [0,7685 \cdot \dot{m}_{ar} + n] \cdot \Delta h_{N_2} + (e - 1) \dot{m}_{ar} \cdot \Delta h_{ar} \quad (6)$$

Sendo que c é o teor de carbono (kg/kg cb), s o teor de enxofre (kg/kg cb), n o teor de nitrogênio (kg/kg cb), e o coeficiente de excesso de ar, \dot{m}_{ar} a massa estequiométrica de ar (kg/kg cb), Δh_{CO_2} a entalpia do CO_2 (kJ/kg), Δh_{SO_2} a entalpia do SO_2 (kJ/kg), Δh_{N_2} a entalpia do N_2 (kJ/kg) e Δh_{ar} a entalpia do ar (kJ/kg).

2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM FLUIDOS VISCOSOS

Segundo Costa (2008, p.15), o comportamento térmico de tanques de armazenamento de Cimento Asfáltico de Petróleo envolve diferentes áreas das ciências térmicas. Além disso, o CAP pode ser tratado como um fluido homogêneo, cujas propriedades médias dependem de sua composição e estrutura química. Ensaio reológicos também sugerem que o CAP pode ser considerado um material viscoelástico. No entanto, o envelhecimento do CAP, causado por processos como oxidação, polimerização e perda de voláteis, é o principal responsável pelas mudanças nas propriedades termofísicas desse material.

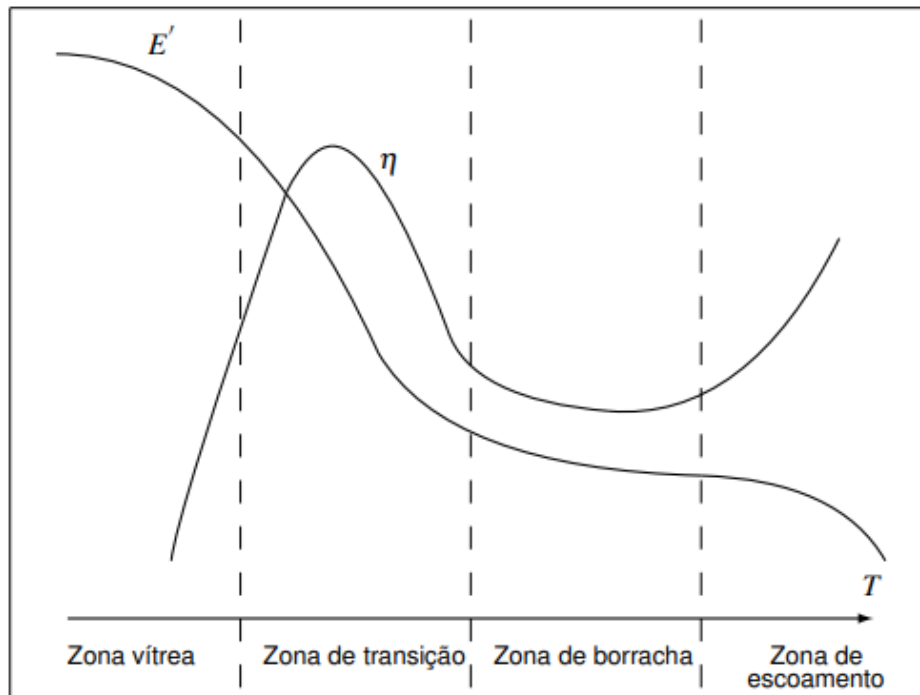
2.2.1 Comportamento térmico de materiais viscoelásticos

A temperatura é o fator mais influente sobre o comportamento dinâmico dos materiais viscoelásticos (Nashif 1985, apud Cazenove, 2010, p.15).

Cazenove (2010, p.9), cita que a dissipação de energia em materiais viscoelásticos provoca elevações locais de temperatura, pois há dependência direta entre os campos de tensões, deformações e o fator de dissipação. Naturalmente, o sistema busca liberar essa energia térmica por mecanismos de condução, convecção ou radiação. No entanto, quando essas trocas não ocorrem de forma eficiente ou quando a geração de calor supera sua remoção, ocorre um aumento contínuo e uniforme de temperatura dentro do material. Esse fenômeno é conhecido como auto aquecimento e é recorrente em situações onde há aplicação de cargas cíclicas sobre materiais poliméricos. Esse aquecimento interno pode alterar profundamente as propriedades mecânicas dos polímeros, comprometendo a funcionalidade de sistemas que dependem do comportamento viscoelástico.

A Figura 2 mostra como o módulo de armazenamento E' e o fator de perda η , variam com a temperatura. Na zona vítrea, o E' é alto e η é baixo. Na zona de transição, o material se torna mais flexível, com E' caindo e η aumentando. Na zona de escoamento, o material se comporta como um fluido, com E' muito baixo e η alto.

Figura 2 - Evolução do fator de perda e o módulo de armazenamento



Fonte: Cazenove (2010, p.15)

A norma DNIT 095-2006 Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material, estabelece as especificações técnicas para cimentos asfálticos de petróleo, incluindo critérios de viscosidade e outras características reológicas. A Tabela 1, mostra a viscosidade Brookfield de diferentes tipos de CAP a várias temperaturas. Cada linha apresenta a viscosidade (em cP) em relação a temperatura. Por exemplo, o CAP 30/45 tem viscosidade de 374 cP a 135°C, 203 cP a 150°C e varia de 76 a 285 cP a 177°C.

Tabela 1 - Viscosidade Brookfield

Viscosidade Brookfield			
CAP	cP a 135°C	cP a 150°C	cP a 177°C
30/45	374	203	76-285
50/70	274	112	57-285
85/100	214	97	28-114
150/200	155	81	28-114

Fonte: Adaptado DNIT095-2006 (2006, p.4).

2.2.2 Difusividade térmica e capacidade calorífica do CAP

Incropera (2003, p.157) cita que difusividade térmica é uma propriedade fundamental na análise de transferência de calor por condução, é definida como a razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica, refletindo a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. A Equação 7 representa o cálculo da difusividade:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (7)$$

No qual k é a condutividade térmica (W/m·K), ρ é a densidade (kg/m³) e c_p a capacidade calorífica específica (kcal/kg°C).

Specht, Borges e Hellmann (2008, p.208) apresentam as seguintes propriedades do CAP: densidade ρ é 1000 kg/m³, a capacidade calorífica c_p é 0,34 kcal/kg°C, a condutividade térmica (K) é 0,17 W/m·K e a difusividade térmica (α) é $1,18 \cdot 10^{-7}$ m²/s.

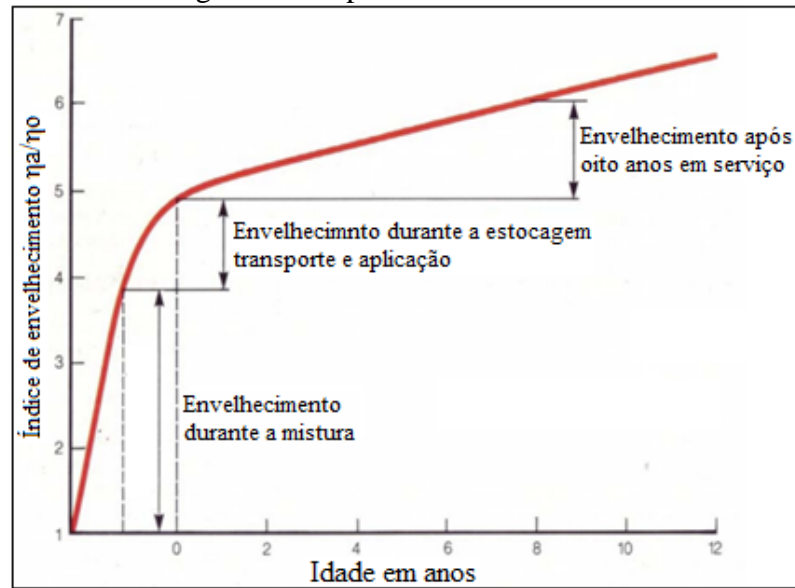
2.2.3 Efeitos do aquecimento excessivo: degradação, oxidação, endurecimento

Para Yang *et al.* (2018, p.1), um polímero orgânico, o betume é suscetível ao envelhecimento devido à exposição prolongada ao oxigênio, radiação ultravioleta e cargas provocadas por veículos. A influência do envelhecimento do betume no desempenho geral do pavimento asfáltico já foi amplamente estudada. É sabido que o envelhecimento leva o betume a apresentar um comportamento mais frágil, aumentando assim o risco de fissuração por fadiga

De acordo com Tonial (2001, p.8), o envelhecimento do ligante asfáltico ocorre em três etapas distintas. A primeira, considerada a de maior impacto, acontece durante a usinagem da mistura asfáltica e corresponde a cerca de 60% do envelhecimento total do ligante. A segunda etapa se dá durante a estocagem, transporte, espalhamento e compactação, sendo responsável por aproximadamente 20% do envelhecimento. Já a terceira etapa ocorre ao longo da vida útil do revestimento, devido à ação do meio ambiente, também representando cerca de 20% do envelhecimento.

A Figura 3 mostra como o ligante asfáltico envelhece ao longo do tempo, aumentando sua viscosidade. O envelhecimento é mais intenso durante a mistura e aplicação, e continua de forma lenta durante os anos de uso. Esse processo afeta a durabilidade do pavimento. Entender essas fases é essencial para prevenir falhas no asfalto.

Figura 3 - Etapas do envelhecimento



Fonte: MORILHA JUNIOR (2004, p.9).

O envelhecimento do ligante asfáltico resulta em seu ressecamento ou endurecimento, provocado pela ação do oxigênio, radiação UV e variações de temperatura ambiente, o que compromete suas propriedades e desempenho ao longo do tempo. As principais causas desse processo incluem a oxidação, a perda de voláteis, o endurecimento físico e o endurecimento exsudativo, que impactam diretamente as características do material (Read e Whitehead, 2023, p.45).

2.3 SISTEMAS DE AQUECIMENTO INDIRETO COM SERPENTINAS

Segundo Silva Júnior (2016, p.16), os trocadores de calor do tipo serpentina são amplamente utilizados na indústria, especialmente em contextos onde o espaço físico é reduzido, já que permitem uma grande área de troca térmica em um volume compacto. Por isso, são preferidos em aplicações como a indústria alimentícia, processos químicos, reatores nucleares e equipamentos médicos, quando comparados aos trocadores de tubos retos.

2.3.1 Princípios de funcionamento das serpentinas térmicas

Segundo Silva Júnior (2016, p.21), o trocador de calor do tipo serpentina apresenta uma configuração em que uma ou mais serpentinas são dispostas dentro de um casco, proporcionando uma elevada taxa de transferência de calor. Além disso, destaca-se por sua capacidade de oferecer ampla área de troca térmica ocupando um espaço físico relativamente

pequeno.

Incropera (2007, p 427) cita que para o dimensionamento e análise de serpentinas térmicas, é essencial o conhecimento do coeficiente global de transferência de calor, uma vez que ele permite avaliar a eficiência da troca térmica entre os fluidos. Esse coeficiente é determinado com base na resistência térmica total do sistema e, no caso de dois fluidos separados por uma parede, sua formulação considera as resistências térmicas associadas às superfícies de troca e ao material intermediário.

De acordo Silva Júnior (2016, p.23), o coeficiente global de transferência de calor é determinado a partir da soma das resistências térmicas associadas à condução, convecção e radiação. No entanto, em muitos casos práticos, especialmente quando o tubo apresenta paredes finas e é feito de material com alta condutividade térmica, a parcela correspondente à condução pode ser desprezada. Assim, a equação do coeficiente global pode ser reduzida à forma apresentada através da Equação 8, focando principalmente nas resistências convectivas.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_q} + \frac{1}{h_f}} \quad (8)$$

No qual U é o coeficiente global de transferência de calor [$W/(m^2 \cdot K)$], h_q é o coeficiente de convecção do fluido quente [$W/(m^2 \cdot K)$] e h_f o coeficiente de convecção do fluido frio [$W/(m^2 \cdot K)$].

2.3.2 Escolha e propriedades do fluido térmico

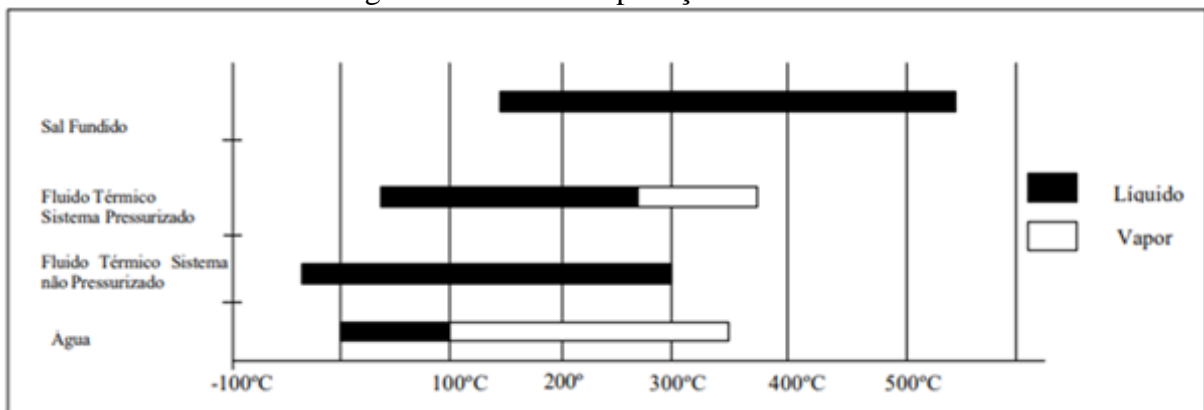
Conforme descrito por Barros (2002, p.10), qualquer fluido que desempenhe o papel de condutor de energia térmica entre a fonte de produção e o ponto de consumo pode ser considerado um fluido térmico. Os fluidos térmicos são desenvolvidos especificamente para estabelecer uma conexão eficiente entre a fonte de energia térmica e o ponto de consumo. Eles podem ser orgânicos ou sintéticos, dependendo da aplicação e, principalmente, da temperatura de operação. Entre as principais características, destacam-se a estabilidade térmica, calor específico elevado, alta condutividade térmica, baixa viscosidade e longa vida útil.

Os óleos sintéticos foram desenvolvidos para garantir maior estabilidade química e durabilidade. Sua utilização é especialmente vantajosa devido à alta estabilidade térmica e a uma série de propriedades físicas, como baixa viscosidade em temperaturas baixas, o que torna os óleos ideais para sistemas que exigem menores perdas de energia, como em bombas e fluidos

térmicos (Tataroglu e Mansoori, 2007 apud Urbano, 2013, p.38).

A Figura 4, apresenta um gráfico comparando a faixa de temperaturas e os estados físicos de quatro fluidos: Sal Fundido, Fluido Térmico Sistema Pressurizado, Fluido Térmico Sistema Não Pressurizado e Água. As barras pretas indicam o estado líquido e as brancas, o estado vapor. O gráfico mostra a transição desses fluidos de líquido para vapor em diferentes temperaturas.

Figura 4 - Faixas de aplicação dos fluidos



Fonte: BARROS (2002, p.11)

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as condições atuais do sistema de aquecimento utilizado nos tanques de armazenagem de Cimento Asfáltico de Petróleo, destacando-se o método de aquecimento por Fogo Tubular, seus principais componentes, funcionamento e limitações operacionais.

Além disso, apresenta-se a proposta de desenvolvimento de um novo sistema de aquecimento utilizando serpentinas internas e fluido térmico, detalhando as etapas do projeto, os critérios de dimensionamento, os materiais empregados e os métodos de validação experimental.

3.1 CENÁRIO ATUAL

Neste tópico são descritas as características do sistema de aquecimento utilizado atualmente para o CAP, destacando suas limitações operacionais, como a distribuição desigual de calor e o controle térmico impreciso. Também são apresentados dados técnicos e operacionais. O objetivo é contextualizar as deficiências do processo atual, justificando a necessidade de melhorias.

3.1.1 Caracterização do sistema de aquecimento atual

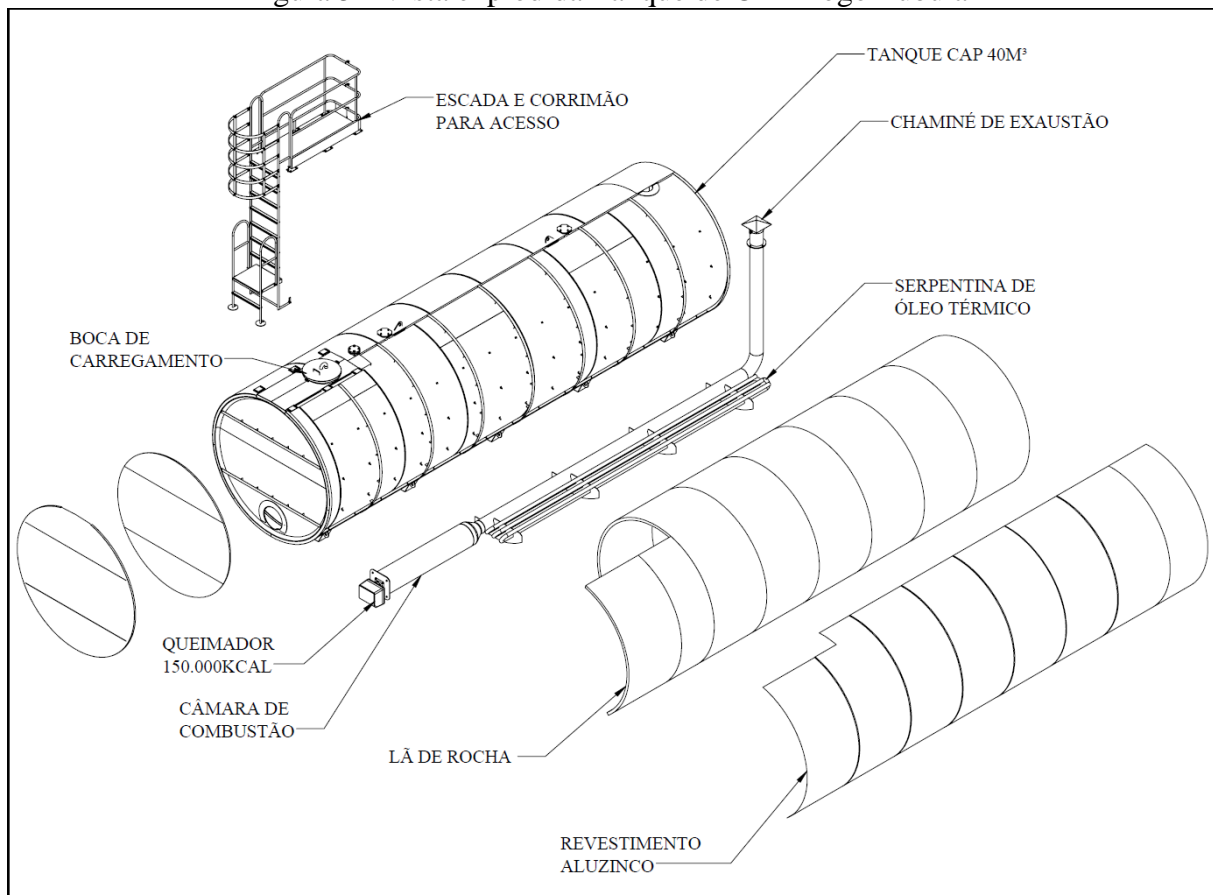
O sistema de aquecimento por Fogo Tubular é uma tecnologia tradicionalmente utilizada para a elevação da temperatura do Cimento Asfáltico de Petróleo em tanques de armazenagem. Trata-se de um método de aquecimento direto, no qual a energia térmica é transferida ao material por meio da queima de combustível em uma câmara de combustão instalada no interior do próprio tanque. Essa câmara é normalmente disposta na parte inferior do tanque, atuando como um corpo emissor de calor.

O tanque é, em geral, de construção cilíndrica horizontal, fabricado em aço carbono, e conta com isolamento térmico externo composto por mantas de lã de rocha revestidas com chapas metálicas para contenção de calor. Internamente, a estrutura é composta por uma câmara metálica fechada, por onde ocorre a queima e expansão dos gases quentes. A transferência de calor ocorre majoritariamente por condução através das paredes do tubo de combustão, além da contribuição por convecção no meio interno do tanque. O controle de temperatura é feito de forma relativamente simples, utilizando sensores instalados próximos ao centro térmico do

tanque, acionando ou desativando o queimador conforme a temperatura atinge o valor pré-estabelecido.

A Figura 5 apresenta a vista explodida do tanque de armazenagem de CAP com sistema de aquecimento por Fogo Tubular. São destacados seus principais componentes, como queimador, câmara de combustão, isolamento térmico e revestimento. A ilustração também evidencia os acessórios estruturais, como escada, corrimão e chaminé.

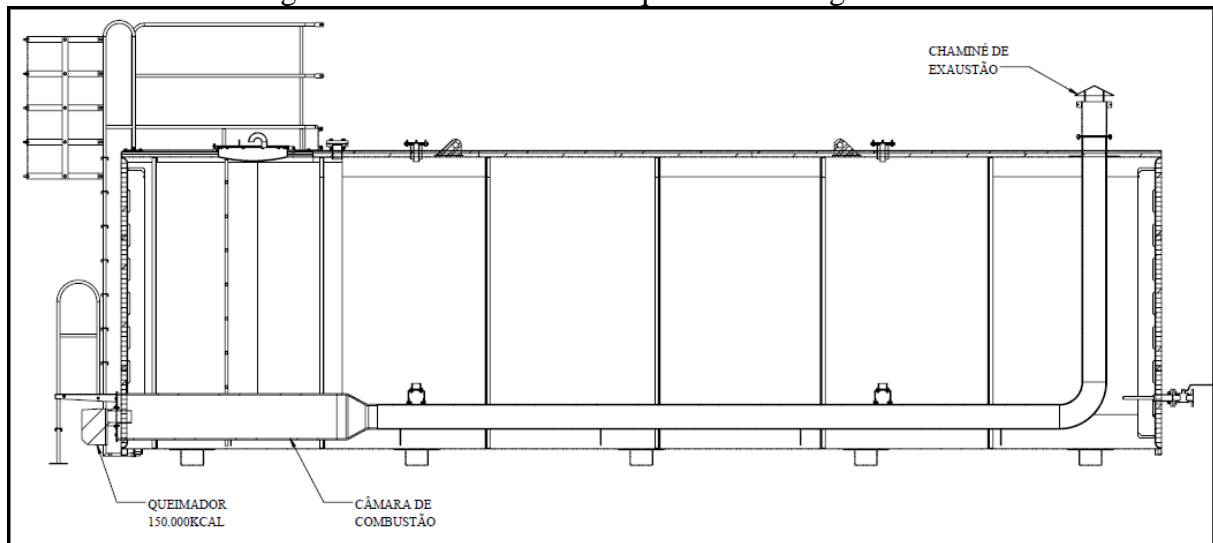
Figura 5 - Vista explodida Tanque de CAP Fogo Tubular



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 6 apresenta uma vista em corte de um tanque de Cimento Asfáltico de Petróleo com sistema de aquecimento por Fogo Tubular. É possível observar a câmara de combustão na parte inferior, responsável pela transferência direta de calor ao CAP.

Figura 6 - Vista em corte Tanque de CAP Fogo Tubular



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Essa configuração é amplamente adotada no setor de pavimentação asfáltica devido à sua relativa facilidade de construção, operação direta e custo inicial competitivo. No entanto, os avanços nas exigências normativas e no desempenho requerido dos pavimentos asfálticos impõem novas demandas que esse sistema já não consegue atender de forma eficiente.

3.1.2 Coleta de dados e contexto técnico-operacional

Para compreender o funcionamento e os desafios do sistema atual, foram realizadas coletas de informações em múltiplas frentes:

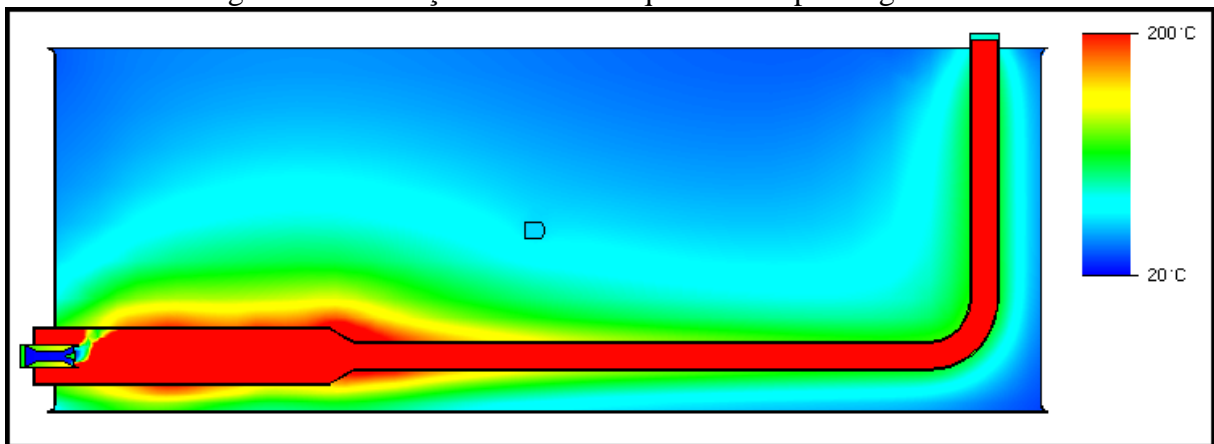
- a) análise de projetos técnicos da Margui Engenharia, incluindo desenhos mecânicos, manuais de operação e relatórios de produção;
- b) visitas técnicas a unidades operacionais equipadas com tanques de Fogo Tubular;
- c) entrevistas com operadores e engenheiros de manutenção, que relataram dificuldades práticas, como paradas não programadas, falhas na câmara e instabilidade térmica;
- d) consultas a normas técnicas e estudos acadêmicos, especialmente as normas DNIT 031/2024 e DNIT 095/2006, que delimitam parâmetros adequados de viscosidade, temperatura e armazenamento para o CAP.

Foram constatadas as seguintes condições médias:

- a) temperatura de trabalho visada: entre 140 °C e 160 °C;
- b) tempo médio de aquecimento: 4 a 6 horas até atingir a faixa operacional;

- c) oscilação térmica elevada durante o ciclo de desligamento e religamento do queimador;
- d) consumo médio estimado de diesel: entre 8 a 12 L/h, dependendo do volume de CAP e das condições externas.
- e) presença de zonas com picos acima de 200 °C, especialmente nas áreas próximas à parede da câmara de combustão, conforme a Figura 7;

Figura 7 - Simulação térmica do aquecimento por Fogo Tubular



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 7 apresenta a simulação térmica do aquecimento do CAP em um tanque com sistema de aquecimento Fogo Tubular em regime transiente. A simulação ilustra a distribuição térmica ao longo do tanque, onde a câmara de combustão, localizada na parte inferior do sistema, aquece diretamente o CAP. As áreas próximas à câmara de combustão, indicadas pela cor vermelha, alcançam temperaturas superiores a 200°C, enquanto as regiões mais distantes da fonte de calor, representadas em tons de azul e verde, permanecem significativamente mais frias.

Esses picos de temperatura localizados são um indicativo da distribuição desigual de calor no processo, o que pode gerar problemas no controle térmico do sistema. A diferença de temperatura prejudica a uniformidade no aquecimento do CAP, o que compromete suas propriedades físico-químicas, como a viscosidade e elasticidade, acelerando seu envelhecimento. Além disso, o superaquecimento em algumas regiões pode levar à formação de crostas ou depósitos carbonizados nas paredes do tanque, afetando a qualidade do material e sua adequação para a aplicação no pavimento asfáltico.

3.1.3 Pontos fortes do sistema atual

Apesar de suas limitações, o sistema de Fogo Tubular possui características que justificam sua utilização no setor:

- a) Baixo custo de investimento inicial: a simplicidade do sistema e a familiaridade do setor com sua operação tornam sua implantação economicamente viável, especialmente para pequenos e médios produtores.
- b) Projeto consolidado: o sistema é amplamente conhecido, o que facilita a padronização de peças, treinamentos e manutenção corretiva simples.
- c) Facilidade de produção e montagem: o sistema não exige manufatura de alta complexidade e pode ser instalado com mão de obra convencional.
- d) Rapidez de aquecimento inicial: a queima direta do combustível permite que o calor se propague rapidamente às camadas mais próximas da câmara.

Tais pontos, entretanto, não suprem as exigências mais recentes da norma DNIT 031/2024.

3.1.4 Limitações técnicas e operacionais do sistema Fogo Tubular

Apesar de sua ampla utilização e simplicidade construtiva, o sistema de aquecimento por Fogo Tubular apresenta limitações técnicas importantes que comprometem a sua adequação às exigências atuais do setor. Uma das principais deficiências é o superaquecimento localizado, causado pela distribuição assimétrica do calor. Como a queima do combustível ocorre diretamente em uma câmara de combustão instalada na parte inferior do tanque, as regiões mais próximas dessa fonte térmica atingem temperaturas muito elevadas, muitas vezes superiores a 200 °C, enquanto outras áreas do tanque aquecem mais lentamente. Essa diferença de temperatura prejudica a uniformidade térmica no interior do tanque, o que compromete as propriedades físico-químicas do CAP, acelera o processo de envelhecimento, favorece a oxidação do material e pode resultar na formação de crostas ou resíduos carbonizados nas paredes internas.

Outra limitação relevante é o controle térmico limitado do sistema. A maioria dos tanques equipados com Fogo Tubular utiliza sensores simples que operam o queimador em sistema de liga/desliga, sem controle proporcional ou modulação da chama. Isso gera oscilações bruscas de temperatura, dificultando o controle fino do processo e contribuindo para a

instabilidade térmica do CAP. Como consequência, o consumo de combustível tende a ser elevado e o risco de degradação térmica do material aumenta.

Além disso, a manutenção da câmara de combustão é tecnicamente desafiadora. Por estar posicionada na parte inferior interna do tanque, seu acesso é bastante restrito, o que dificulta a realização de inspeções, limpezas ou intervenções corretivas. Quando ocorrem falhas, trincas ou desgaste estrutural da câmara, torna-se necessário interromper completamente a operação, esvaziar o tanque e, em muitos casos, substituir o componente danificado. Esse processo implica em longos períodos de inatividade e altos custos com manutenção.

Por fim, o sistema Fogo Tubular encontra dificuldades para atender às normas técnicas vigentes, como a DNIT 031/2024, que exige que o aquecimento do CAP seja gradual, uniforme e sob controle preciso para preservar suas propriedades viscoelásticas. Diante disso, esse modelo de aquecimento se mostra defasado frente às exigências de qualidade, durabilidade e sustentabilidade exigidas atualmente no setor de infraestrutura viária.

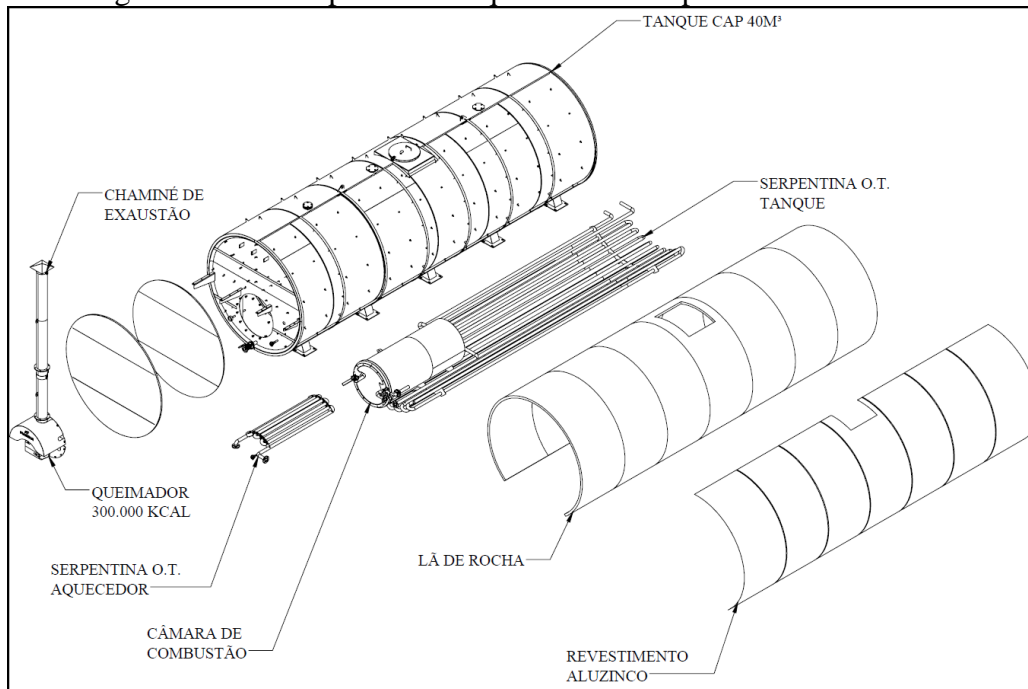
3.2 PROPOSTA PRELIMINAR DE INTERVENÇÃO: SISTEMA DE AQUECIMENTO COM SERPENTINAS INTERNAS

Diante das limitações operacionais e técnicas do sistema de aquecimento por Fogo Tubular, propõe-se a substituição por um sistema indireto de aquecimento por serpentinas internas com circulação de fluido térmico. Essa solução visa garantir a uniformidade térmica no interior do tanque, reduzir riscos de degradação do CAP e atender às exigências da norma DNIT 031/2024, que recomenda controle gradual e eficiente da temperatura.

O novo sistema envolve a instalação de serpentinas metálicas no interior do tanque, através das quais circulará um fluido térmico aquecido por uma caldeira instalada também dentro do tanque de CAP. À medida que o fluido térmico percorre as serpentinas, ele transfere calor de maneira indireta para o CAP, aquecendo-o de forma gradual, controlada e uniforme. Esse processo elimina o contato direto da chama com o produto, evitando o superaquecimento localizado e garantindo uma melhor preservação das propriedades físico-químicas do ligante asfáltico.

A Figura 8 apresenta a vista explodida do tanque de CAP com sistema de aquecimento por serpentinas internas. São destacados componentes como as serpentinas de óleo térmico, a câmara de combustão e o isolamento térmico. A imagem também evidencia o revestimento externo, a escada e o corrimão para acesso, além da chaminé para a liberação de gases da combustão.

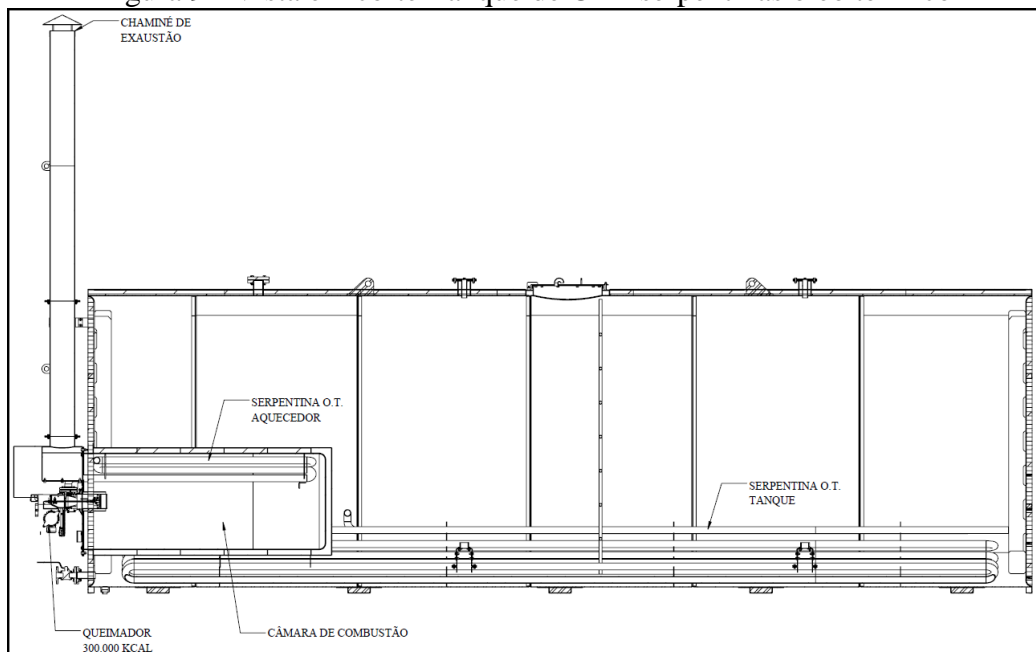
Figura 8 - Vista explodida Tanque de CAP serpentinas óleo térmico



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 9 apresenta uma vista em corte do tanque de Cimento Asfáltico de Petróleo com sistema de aquecimento por serpentinas internas. Nessa configuração, é possível observar que a câmara de combustão está localizada dentro do tanque, sendo responsável pela geração de calor. O fluido térmico aquecido circula pelas serpentinas internas, transferindo calor de forma controlada e uniforme para o CAP.

Figura 9 - Vista em corte Tanque de CAP serpentinas óleo térmico



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2.1 Execução da Intervenção: Recursos, métodos e ferramentas utilizados

A execução do novo sistema de aquecimento envolveu a utilização de aço carbono para a construção do corpo do tanque, serpentinas e câmara de combustão, devido à sua durabilidade, resistência e facilidade de fabricação. O aço carbono foi escolhido por ser um material de fácil processamento, com ampla disponibilidade de equipamentos para sua fabricação e montagem.

Para a fabricação do sistema, foram utilizadas máquinas de corte e soldagem. Além disso, foram usados instrumentos de medição como termopares para monitorar a temperatura do fluido térmico e do CAP, e manômetros para controlar a pressão interna do sistema.

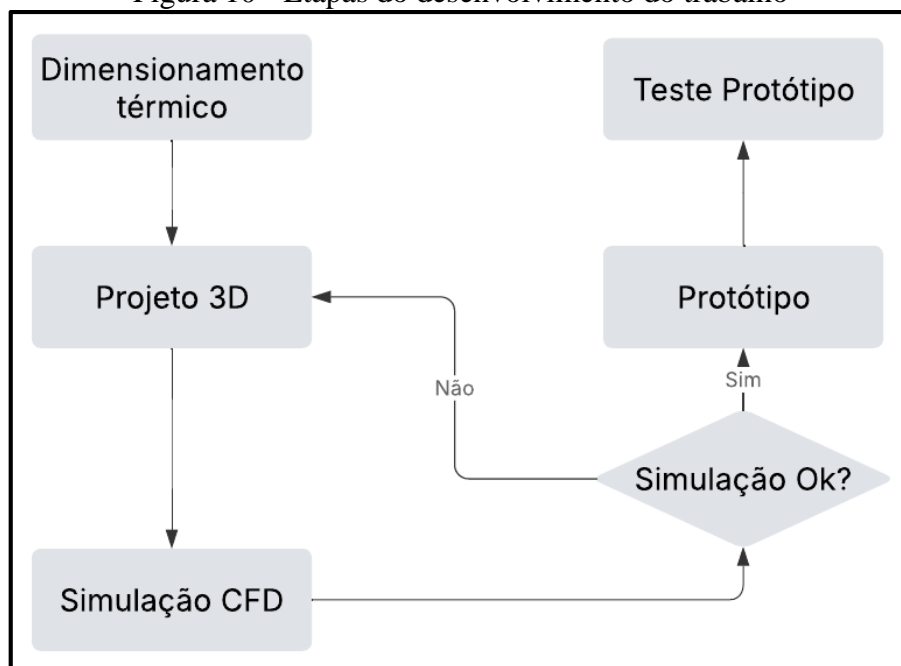
O desenvolvimento do projeto foi realizado com o uso do software de modelagem CAD SolidWorks e a simulação CFD, por meio da ferramenta Ansys CFX.

Durante a construção do protótipo, testes de pressão foram realizados para verificar a estanqueidade e resistência das serpentinas e da caldeira. Esses testes são essenciais para garantir que o sistema seja seguro e eficiente durante a operação.

3.2.2 Etapas do processo de desenvolvimento do protótipo

O fluxograma ilustrado na Figura 10 apresenta as etapas do desenvolvimento do protótipo do novo sistema de aquecimento por serpentinas internas.

Figura 10 - Etapas do desenvolvimento do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Este processo abrange desde a avaliação do sistema atual até a construção do protótipo final descritos abaixo.

- a) Dimensionamento térmico: a fase de cálculos térmicos é responsável por determinar a quantidade exata de calor necessária para o aquecimento do CAP. Os cálculos incluem a análise das propriedades térmicas do CAP e a capacidade de condução do calor pelas serpentinas.
- b) Projeto 3D: após os cálculos térmicos, é desenvolvido o projeto 3D do tanque de CAP e sistema de aquecimento. Nessa etapa, é utilizado o software de modelagem CAD SolidWorks.
- c) Simulação CFD: com o projeto 3D em mãos, é realizada uma simulação computacional utilizando o método de *Computational Fluid Dynamics*.
- d) Protótipo: o protótipo do novo sistema de aquecimento é então construído com base no projeto 2D. Durante essa fase, são fabricadas as serpentinas, a caldeira o tanque, e o sistema será montado.
- e) Teste do protótipo: após a construção do protótipo, são realizados testes experimentais para verificar se o sistema operava conforme o esperado. Esses ensaios permitem avaliar a uniformidade da distribuição de temperatura e a confiabilidade do funcionamento durante a operação.

4 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Este capítulo é destinado ao detalhamento do projeto do sistema de aquecimento por serpentinas internas para tanques de armazenagem de CAP, abrangendo o desenvolvimento desde as etapas de concepção, dimensionamento térmico, modelagem 3D, simulação CFD e validação do protótipo. Também são descritos os recursos, métodos e ferramentas aplicadas, bem como as decisões de projeto que resultaram na proposta final do sistema.

4.1 DIMENSIONAMENTO TÉRMICO

O dimensionamento térmico de sistemas de aquecimento é uma etapa crucial no projeto de equipamentos que envolvem troca de calor. Este processo garante que o sistema seja capaz de fornecer a quantidade de energia necessária para elevar e manter a temperatura do fluido de trabalho nas especificações desejadas, de forma eficiente e segura.

Esta seção detalha os cálculos térmicos realizados para o sistema de aquecimento por serpentinas internas, utilizando como base os princípios da transferência de calor e as especificações dos componentes.

4.1.1 Parâmetros de entrada e propriedades dos materiais

Para a realização do dimensionamento térmico, é essencial a definição de parâmetros de entrada e a consideração das propriedades termofísicas dos materiais envolvidos. A Tabela 2 apresenta os principais parâmetros utilizados, provenientes de pesquisas bibliográficas e catálogos técnicos de fornecedores.

Tabela 2 – Parâmetros de entrada

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Potência do Queimador	300.000	kcal/h	Importherm (Fornecedor)
Eficiência do Queimador	60	%	Eletróbrás (2005)
Potência real do Queimador	180.000	kcal/h	Autor (2025)
CP Óleo Térmico Grau ISO100	0,58	kcal/kg°C	Lubrax Utile OT (2020)
Densidade do Óleo Térmico Grau ISO100	885	kg/m ³	Lubrax Utile OT (2020)
Vazão do Óleo Térmico	20	m ³ /h	Edral (Fornecedor)
Vazão mássica Óleo Térmico	17.700	kg/h	Autor (2025)
Massa do CAP	40.000	kg	Autor (2025)
Calor Específico (CP) do CAP	0,34	kcal/kg°C	Spech <i>et al</i> (2008)
Temperatura Inicial do CAP	20	°C	Temperatura ambiente
Temperatura Final do CAP	150	°C	DNIT (2024)
Área superfície da Camisa	13,17	m ²	Autor (2025)

Área superfície da Serpentina	5,29 m ²	Autor (2025)
Área total de troca térmica	18,46 m ²	Autor (2025)

Dentre os parâmetros da Tabela 2, destacam-se quatro pela sua relevância no dimensionamento térmico. O calor específico do óleo térmico grau ISO 100 (0,58 kcal/kg·°C), que define a capacidade do fluido em armazenar e transferir calor; a vazão do óleo térmico (20 m³/h), correspondente à capacidade da bomba utilizada em projetos anteriores, essencial para garantir circulação eficiente e distribuição uniforme de calor; a temperatura final do CAP (150 °C), definida conforme a norma DNIT 031/2024 para manter as propriedades viscoelásticas do material; e a massa do CAP (40 000 kg), que reflete a quantidade usualmente transportada por caminhões-tanque, servindo como referência prática para o dimensionamento do sistema.

4.1.2 Variação de temperatura do óleo térmico

A variação da temperatura do óleo térmico está relacionada com a potência do queimador (distribuída entre a camisa da câmara de combustão) e a serpentina de aquecimento, proporcionalmente às suas respectivas áreas de superfície de troca térmica. Essa distribuição pode ser calculada por meio da relação da área da seção pela área total de aquecimento, conforme a Equação 9.

$$P_{sec} = \frac{A_{sec}}{A_{tot}} \times P_{real} \quad (9)$$

Onde P_{sec} é a potência do queimador destinado a seção de aquecimento (kcal/h), A_{sec} é a área da seção (m²), A_{tot} a área total do sistema de aquecimento(m²) e P_{real} é a potência real do queimador (kcal/h).

A Tabela 3 apresenta as áreas de troca térmica em cada seção do novo sistema de aquecimento. Na coluna Seção, estão descritas as superfícies consideradas no dimensionamento térmico, com seus respectivos valores de potência e unidades.

Seção	Valor	Unidade
Camisa	128.418	kcal/h
Serpentina	51.582	kcal/h

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A variação da temperatura em cada seção de aquecimento pode ser calculada através da Equação 1, os resultados deste aquecimento estão descritos na Tabela 4, onde a coluna Seção descreve as superfícies com seus valores e unidades.

Tabela 4 – Cálculos variação de temperatura em cada seção

Seção	Valor	Unidade
Serpentina	5	°C
Camisa	13	°C
Variação total de temperatura (ΔT)	18	°C

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.1.3 Tempo teórico aquecimento CAP

O tempo teórico necessário para aquecer o CAP é calculado dividindo o calor total necessário para elevar a temperatura deste até a temperatura desejada pela potência real do queimador, conforme a Equação 10.

$$t_{aq} = \frac{Q_{CAP}}{P_{real}} \quad (10)$$

Onde t_{aq} é o tempo teórico de aquecimento (h), Q_{CAP} é a quantidade de calor necessária para aquecer o CAP (kcal) e P_{real} é a potência real do queimador (kcal/h).

A quantidade de calor necessária para aquecer o CAP (Q_{CAP}), pode ser calculado pela Equação 1. Desta forma o tempo necessário para aquecimento do CAP, pode ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 5 – Cálculo tempo necessário de aquecimento

Descrição	Valor	Unidade
Quantidade de calor para aquecer o CAP (Q_{CAP})	1.768.000	kcal
Potência real do queimador (P_{real})	180.000	kcal/h
Tempo teórico aquecimento (t_{aq})	9,8	h

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Com base nos cálculos apresentados, conclui-se que o sistema de aquecimento proposto, composto por uma camisa externa e uma serpentina interna, é capaz de fornecer a energia térmica necessária para aquecer o CAP de 20 °C até 150 °C de forma eficiente. A potência real do queimador (180.000 kcal/h), distribuída proporcionalmente às áreas de troca térmica de cada seção, garante uma variação total de temperatura de 18 °C no óleo térmico, o que está de acordo com o perfil de transferência de calor esperado. A análise também demonstrou que o tempo teórico necessário para o aquecimento completo do CAP é de aproximadamente 9,8 horas.

4.2 SIMULAÇÃO CFD

As simulações foram conduzidas no software ANSYS® CFX. O objetivo foi avaliar o desempenho térmico do sistema proposto e verificar se o dimensionamento térmico está adequado, por meio da comparação entre o calor fornecido por meio do sistema de aquecimento e o calor efetivamente absorvido pelo CAP no tanque.

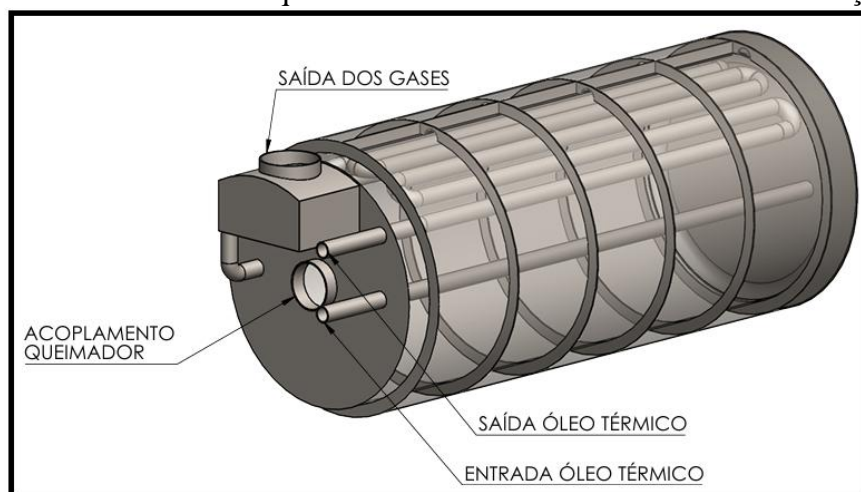
O escopo e a estratégia da simulação, a metodologia de modelagem, a modelagem tridimensional para simulação, a criação da malha e a seleção do tipo de elementos, o refinamento e os critérios localizados da malha, são apresentados no Apêndice A.

4.2.1 Modelos utilizados na simulação

De forma semelhante ao que foi realizado nos cálculos analíticos, a simulação numérica também considerou o aquecedor de óleo térmico e o tanque de CAP como modelos separados.

A Figura 11 apresenta o modelo tridimensional da caldeira desenvolvido para a simulação CFD. Nela é possível visualizar o acoplamento do queimador, a câmara de combustão, a serpentina interna e os bocais de entrada e saída do óleo térmico. Essa configuração foi utilizada para calcular a elevação de temperatura do óleo térmico ao longo de todo o percurso na serpentina.

Figura 11 - Modelo 3D do aquecedor de óleo térmico utilizado na simulação CFD

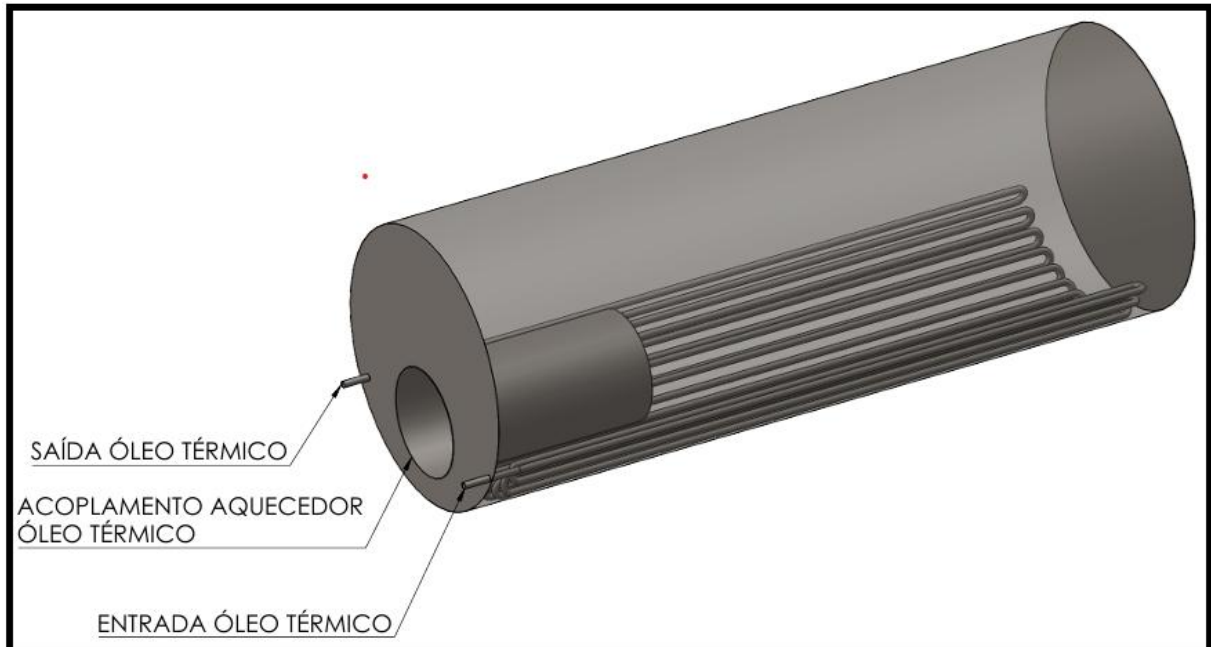


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 12 mostra o modelo do tanque de CAP com a serpentina interna, utilizado na segunda etapa da simulação. Nessa representação, observa-se a entrada e saída de óleo térmico, bem como o acoplamento ao aquecedor. A geometria foi configurada de modo a simular a

transferência de calor entre o óleo já aquecido e o CAP armazenado no interior do tanque, permitindo avaliar a evolução da temperatura do material até atingir as condições ideais de operação.

Figura 12 - Modelo 3D do tanque de CAP utilizado na simulação CFD



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A separação das simulações em duas etapas reduziu o custo computacional e permitiu utilizar a temperatura de saída do aquecedor como condição de contorno para o tanque. Essa estratégia garantiu melhor convergência numérica, maior controle dos parâmetros de entrada e facilitou o ajuste de malha e modelos físicos em cada subsistema.

4.2.2 Condições de contorno

As condições de contorno foram definidas de modo a manter total coerência com o dimensionamento térmico previamente realizado, assegurando que os mesmos parâmetros de entrada fossem utilizados nas simulações no ANSYS® CFX.

Para o domínio dos gases, aplicou-se na entrada da câmara de combustão um escoamento de 0,00297 kg/s de ar a 1300 K, valor correspondente à vazão de ar de combustão fornecida pelo fabricante do queimador. Essa condição foi definida como Mass Flow Inlet, representando os gases quentes gerados durante a queima.

No domínio do óleo térmico, adotou-se uma condição de entrada do tipo Mass Flow Inlet com o fluido entrando a 293 K (20 °C) e vazão equivalente a 20 m³/h, conforme

especificação da bomba de circulação utilizada no projeto.

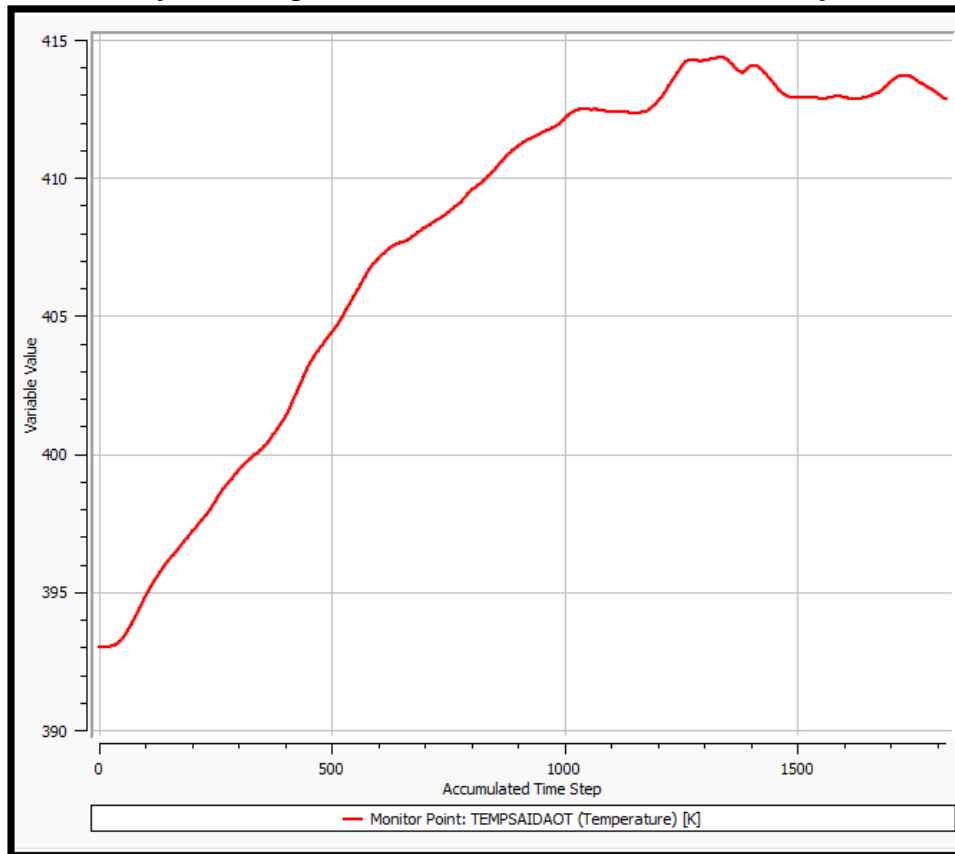
As propriedades dos materiais incluindo óleo térmico, aço das serpentinas e casco, e o CAP foram definidas de acordo com os dados do dimensionamento. Também são especificadas as condições de operação, como a potência térmica do queimador, os regimes contínuos ou intermitentes e as metas de temperatura para o CAP.

4.2.3 Resultados simulação CFD na câmara de combustão

Com a malha devidamente validada e as condições de contorno aplicadas (Apêndice A), foi realizada a solução numérica do problema utilizando o ANSYS® CFX 2024 R1. A simulação CFD da câmara de combustão teve como objetivo principal avaliar a distribuição de temperatura dos gases quentes e a eficiência da transferência de calor para a serpentina de óleo térmico. Os resultados obtidos permitem visualizar o campo de temperatura no óleo térmico e nos gases de combustão, identificar as regiões de maior troca de calor e verificar se o aquecimento atingiu os valores projetados para a operação do sistema.

A Figura 13 apresenta o gráfico de monitoramento da temperatura na saída do óleo térmico ao longo das iterações da simulação. Nota-se que a temperatura inicial de aproximadamente 393 K (120 °C) aumenta gradualmente até estabilizar em torno de 413 K (140 °C), resultando em um ΔT de 20 K (20 °C). Esse comportamento indica que o balanço térmico foi atingido e que o sistema alcançou a condição de operação projetada para o aquecimento do óleo térmico.

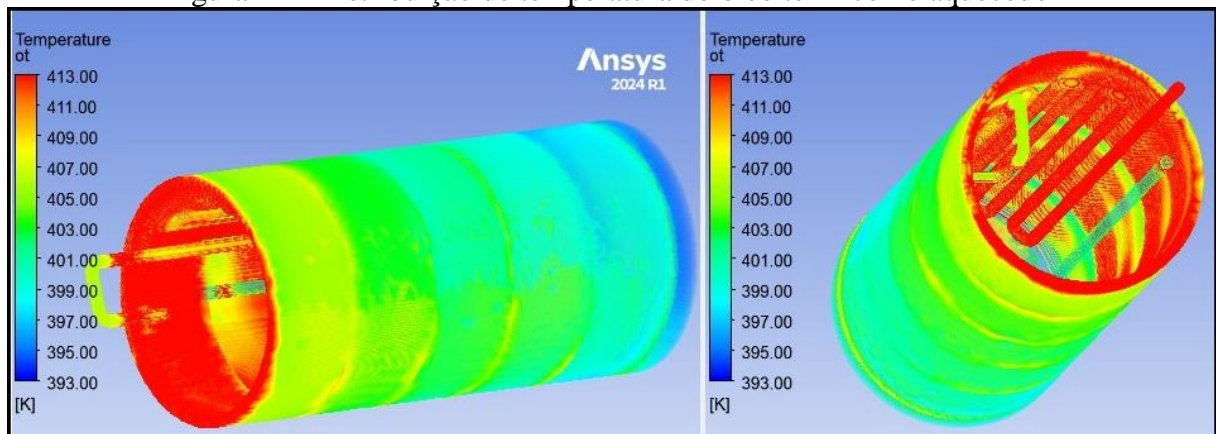
Figura 13 - Evolução da temperatura na saída do óleo térmico em função das interações



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 14 mostra a distribuição de temperatura do óleo térmico ao longo da serpentina. Nota-se que o aquecimento é gradativo na camisa do aquecedor iniciando na parte traseira e posteriormente na serpentina interna. Essa informação é fundamental para validar o dimensionamento da serpentina e assegurar que o óleo térmico sai do aquecedor, com energia suficiente para aquecer o CAP no tanque.

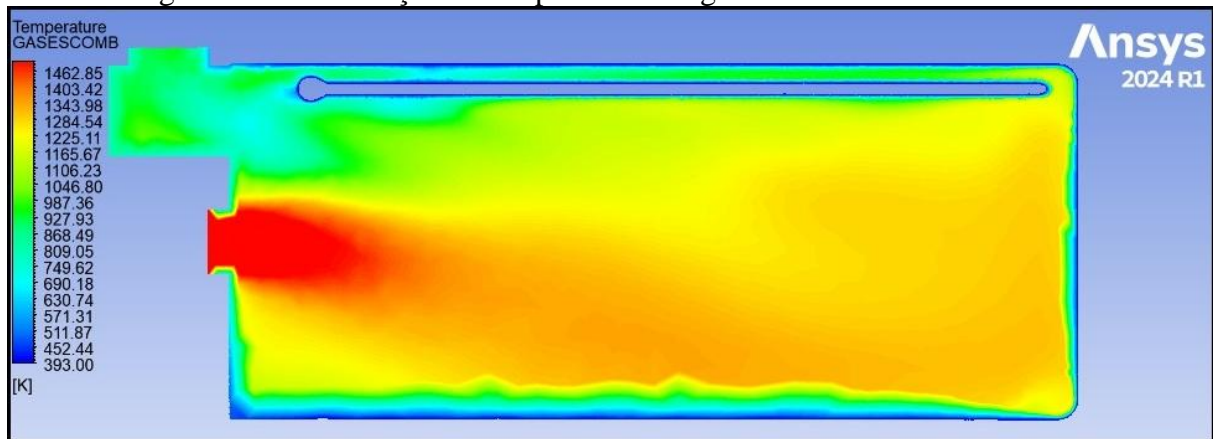
Figura 14 - Distribuição de temperatura do óleo térmico no aquecedor



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Por fim a Figura 15 mostra o campo de temperatura dos gases na câmara de combustão em corte longitudinal. Nota-se a região de alta temperatura próxima ao queimador, que atinge cerca de 1460 K (1187 °C), e o gradiente decrescente ao longo da câmara. Essa distribuição garante que a transferência de calor ocorra de forma eficiente para a serpentina, aproveitando ao máximo a energia liberada pela queima do combustível.

Figura 15 - Distribuição de temperatura dos gases na câmara de combustão



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

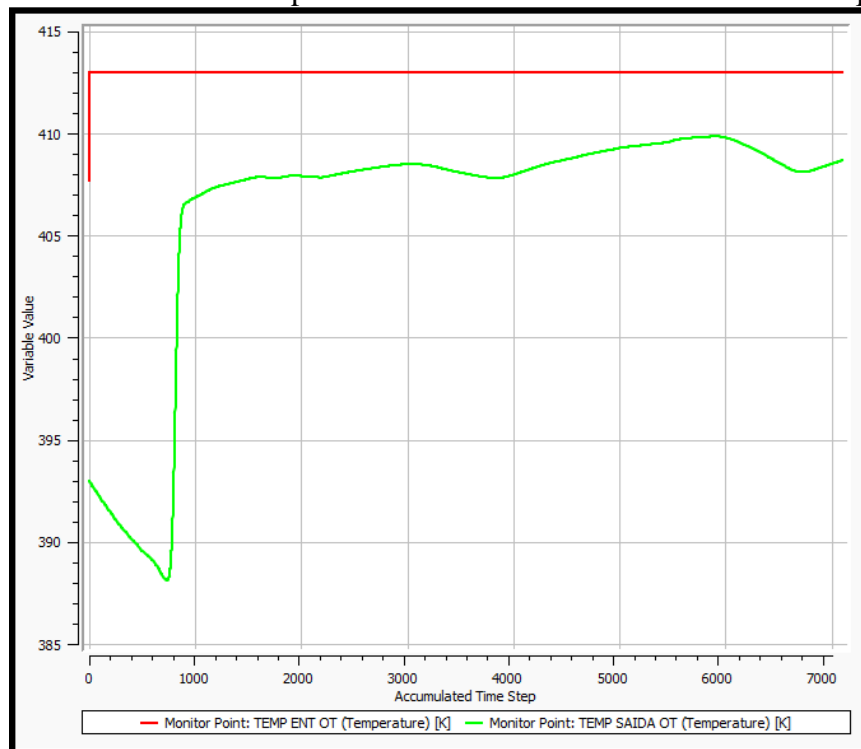
4.2.4 Resultados simulação CFD no tanque de CAP

A simulação CFD aplicada ao tanque de CAP teve como objetivo analisar o comportamento térmico do fluido armazenado quando submetido ao aquecimento indireto pela serpentina de óleo térmico. Esse modelo permitiu compreender não apenas a evolução temporal da temperatura, mas também a distribuição espacial do calor no interior do tanque, fornecendo informações importantes para avaliar a eficiência do sistema.

Na Figura 16 é apresentado o monitoramento da temperatura de entrada e saída do óleo térmico. A linha vermelha representa a entrada, estabilizada em torno de 413 K (140 °C), enquanto a linha verde indica a saída, que após oscilações iniciais atingiu aproximadamente 408 K (135 °C).

A subida repentina observada no gráfico ocorre no momento em que o óleo térmico aquecido a 413 K, proveniente da câmara de combustão, percorre toda a extensão da serpentina e começa efetivamente a sair do sistema. Inicialmente, o fluido que estava no interior da serpentina encontrava-se a 393 K, e por isso a temperatura de saída era menor. À medida que o novo óleo aquecido substitui o fluido frio, ocorre o aumento súbito da temperatura até atingir o regime estacionário. A variação final de cerca de 5 K entre entrada e saída corresponde à perda de calor do óleo térmico para o CAP durante o percurso.

Figura 16 – Monitoramento temperatura entrada e saída de óleo térmico tanque de CAP

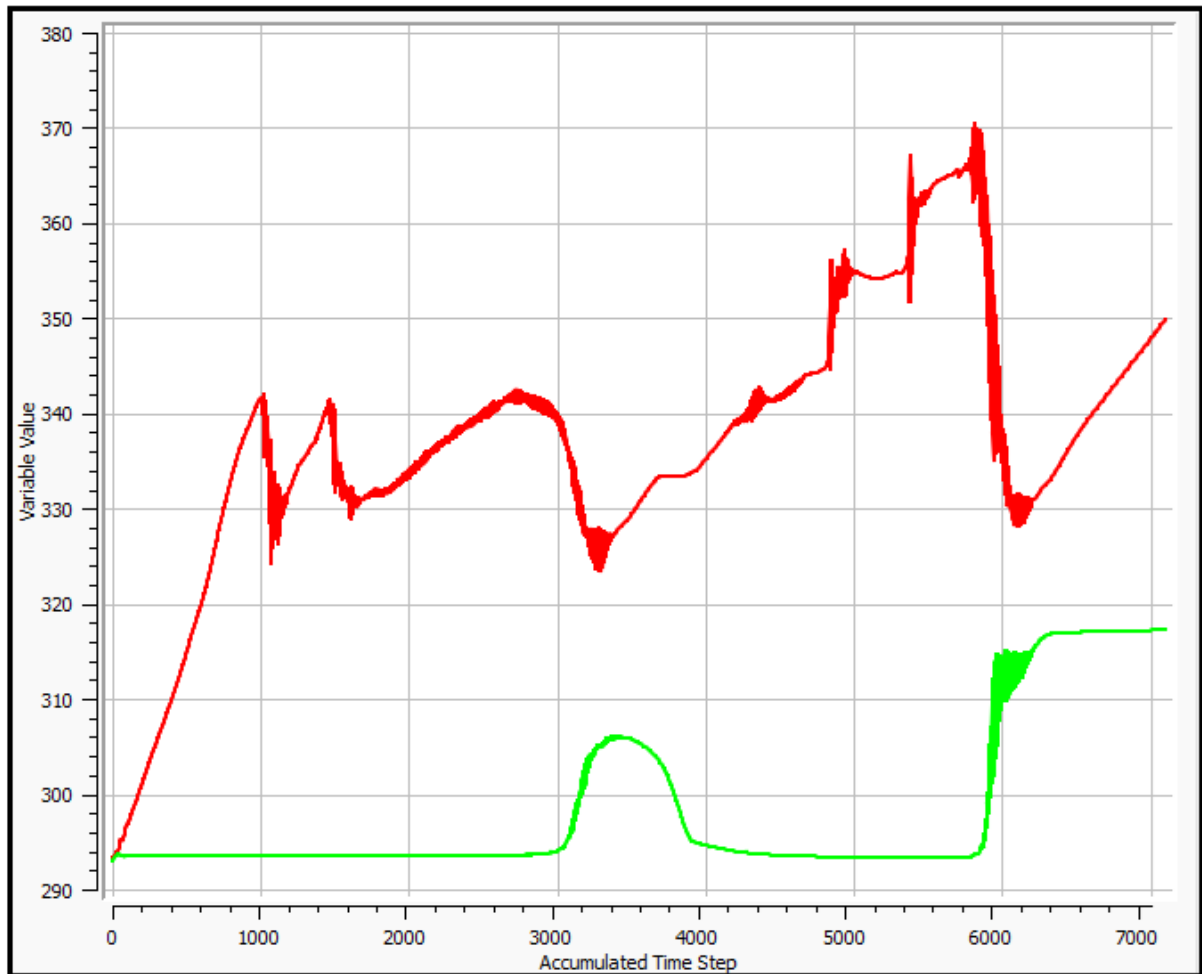


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 17 apresenta o histórico da temperatura média do CAP durante a simulação, obtido a partir de dois pontos de monitoramento: um localizado no centro do tanque (linha verde) e outro na parte inferior (linha vermelha). O fluido, inicialmente a 293 K (20 °C), manteve-se praticamente constante nos primeiros instantes devido à sua elevada inércia térmica. Com o avanço das iterações, observa-se um aumento gradual até atingir valores próximos a 318 K (45 °C).

As oscilações observadas nas curvas de temperatura refletem o movimento natural do CAP no interior do tanque. À medida que o fluido aquece, sua viscosidade diminui, e o CAP mais quente e menos denso tende a subir, enquanto o CAP mais frio, mais viscoso e “duro”, desce para as regiões inferiores. Essa movimentação por convecção natural promove uma contínua troca de calor entre as camadas, resultando em variações periódicas na temperatura média medida.

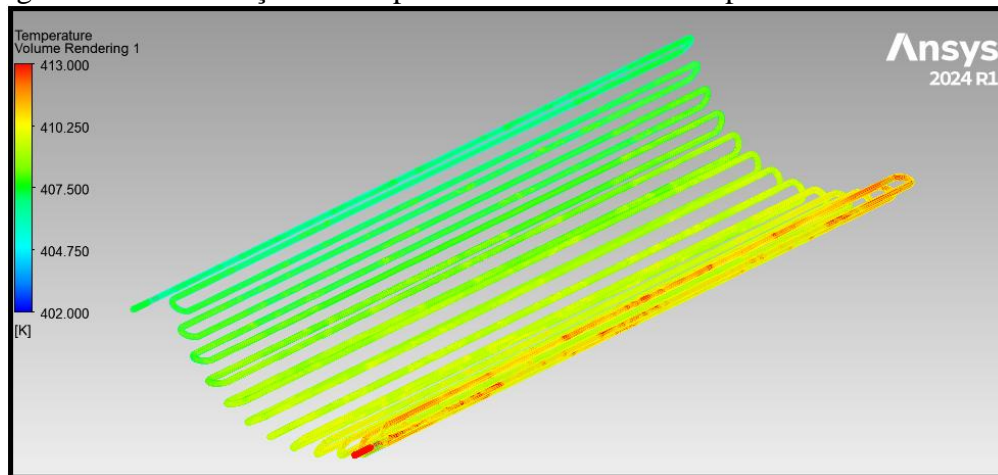
Figura 17 - Monitoramento da temperatura do CAP



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na Figura 18, o volume *rendering* da serpentina apresenta a distribuição de temperatura ao longo de suas voltas. Nota-se que a região inicial do tubo apresenta maiores temperaturas, próximas a 413 K (140 °C), enquanto nas últimas voltas ocorre uma leve redução, atingindo valores próximos de 404 K (131 °C). Essa variação é consequência direta da perda de calor para o CAP, sendo um indicativo da efetividade da troca térmica. Observa-se, contudo, que a diferença de temperatura fornecida pela serpentina ao CAP é menor do que a diferença de temperatura promovida pela câmara de combustão no aquecimento do óleo térmico.

Figura 18 - Distribuição de temperatura no volume da serpentina de óleo térmico

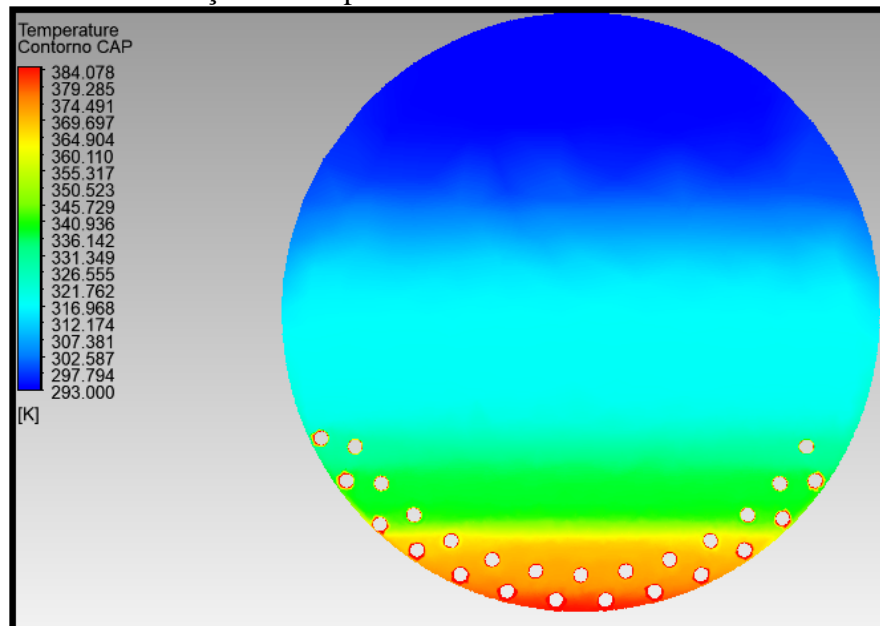


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 19 apresenta o contorno de temperatura do CAP em uma seção transversal do tanque, evidenciando o comportamento térmico do fluido durante o processo de aquecimento indireto. Observa-se que as maiores temperaturas, próximas de 384 K (111 °C), concentram-se na região inferior, junto às serpentinas de aquecimento, onde ocorre a transferência direta de calor proveniente do óleo térmico. À medida que a altura aumenta, ocorre uma redução gradual da temperatura, atingindo valores próximos de 293 K (20 °C) na parte superior.

Esse gradiente térmico caracteriza a estratificação natural do CAP, típica de fluidos altamente viscosos aquecidos por convecção limitada. Nota-se, entretanto, que não há ocorrência de pontos de superaquecimento ou gradientes térmicos excessivos, o que indica uma distribuição homogênea e controlada do calor ao longo do volume do fluido.

Figura 19 - Distribuição de temperatura no CAP em corte transversal do tanque



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.3 TESTES DO PROTOTIPO

Após a etapa de simulações numéricas e validação teórica do modelo térmico, foi realizada a fase experimental de validação em campo. O objetivo principal foi verificar o desempenho térmico do sistema de aquecimento de óleo térmico. Nessa etapa, o sistema foi testado sem a presença de CAP no tanque, de forma a isolar o comportamento do circuito de aquecimento e garantir a confiabilidade dos dados referentes ao aquecimento indireto.

4.3.1 Metodologia de preparação para os testes

Inicialmente, o sistema foi preenchido com 800 litros de óleo térmico Petronas ISO VG 100. O carregamento foi realizado por gravidade utilizando uma bomba pneumática acoplada diretamente aos reservatórios de 200 litros de óleo, conforme a Figura 20.

Figura 20 – Carregamento do óleo térmico



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Após o abastecimento do sistema, foi acionada somente a bomba de circulação, mantendo o queimador desligado. Nessa etapa, foram abertos alguns pontos da linha de retorno para permitir a remoção do ar aprisionado nas tubulações, assegurando que todo o circuito estivesse completamente preenchido pelo fluido térmico. A circulação foi mantida até que a pressão se estabilizasse, indicando que o sistema estava devidamente purgado e pronto para o início do aquecimento.

Concluída a etapa de remoção de ar, iniciou-se o aquecimento gradual do óleo térmico, com incrementos controlados de 20 °C. Após cada elevação de temperatura, o sistema era mantido em regime estacionário por aproximadamente 20 minutos, permitindo a estabilização térmica e a equalização da pressão ao longo da linha.

Ao atingir 110 °C, o aquecimento foi interrompido e o sistema permaneceu em condição de espera por cerca de 40 minutos, a fim de eliminar completamente a umidade residual presente no fluido e nas paredes internas das tubulações. Essa etapa foi essencial para evitar formação de vapor e cavitação na bomba de circulação.

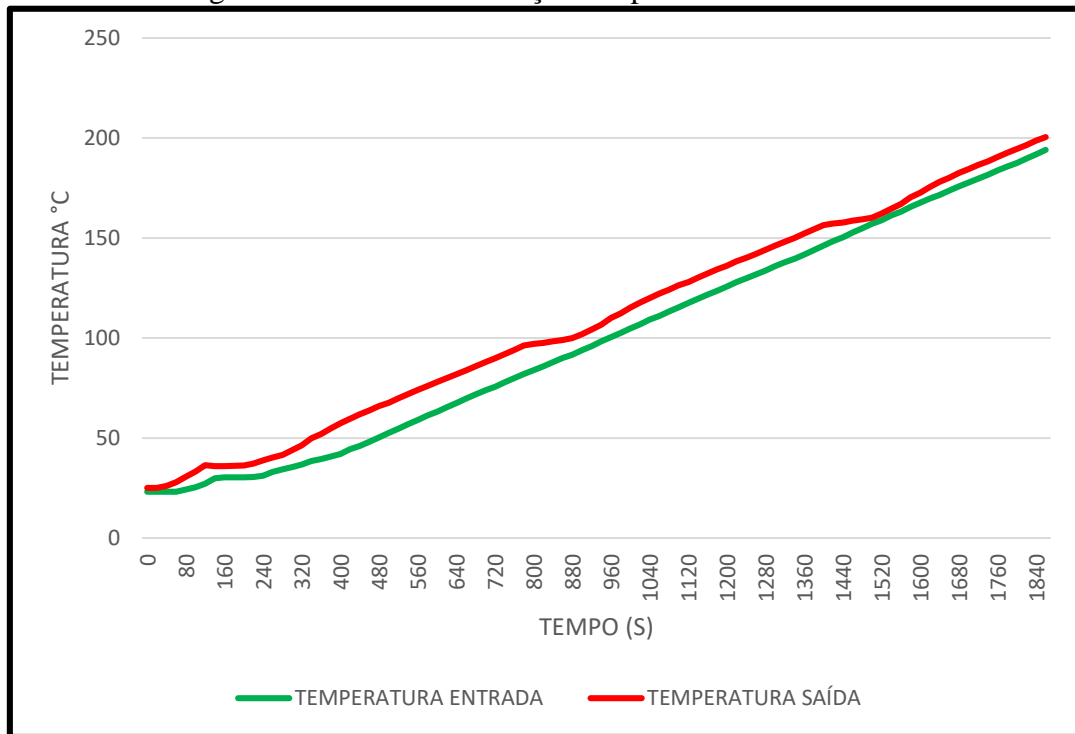
Após a remoção total da umidade, o processo de aquecimento foi retomado, seguindo o mesmo procedimento de incrementos de 20 °C e períodos de estabilização, até alcançar 200 °C, temperatura correspondente à condição nominal de operação do sistema. Após a conclusão do processo de aquecimento gradual e a estabilização térmica em 200 °C, o sistema foi desligado e deixado resfriar naturalmente, permitindo que o fluido térmico retornasse a uma condição de temperatura ambiente.

4.3.2 Resultados obtidos nos testes

Com o sistema em temperatura ambiente, foi então configurada a temperatura de operação de 200 °C diretamente no controlador eletrônico, iniciando um novo ciclo de aquecimento automático. Durante esse ensaio, o sistema operou de forma contínua, e as temperaturas de entrada e saída do óleo térmico foram monitoradas em tempo real, registrando-se o comportamento térmico do circuito.

A Figura 21 apresenta o gráfico de evolução da temperatura ao longo do tempo. Observa-se que tanto a temperatura de entrada (linha verde) quanto a temperatura de saída (linha vermelha) crescem de forma praticamente linear, evidenciando a estabilidade do processo de aquecimento.

Figura 21 – Gráfico da relação temperatura óleo térmico



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 22 apresenta a medição das temperaturas de entrada e saída do óleo térmico em uma das etapas intermediárias de aquecimento. Observa-se que o fluido entra no sistema a 48,1 °C e sai a 63,8 °C, resultando em um ΔT de aproximadamente 15,7 °C.

Figura 22 – Monitoramento das temperaturas de entrada e saída do óleo térmico

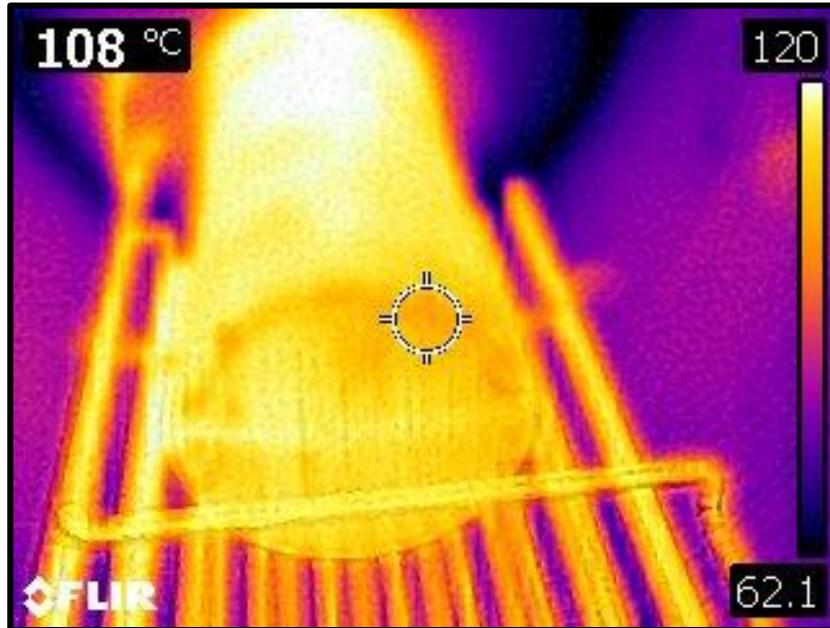


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 23 apresenta a imagem térmica do interior do tanque, onde é possível observar a caldeira e a serpentina de óleo térmico. As temperaturas registradas são próximas entre si, cerca de 108°C, indicando uma transferência de calor homogênea ao longo do sistema. Nota-se que tanto a serpentina quanto a câmara de combustão, responsáveis pelo aquecimento

indireto do CAP, não atingem temperaturas excessivas, permanecendo dentro de um limite seguro de operação. Isso confirma que o aquecimento ocorre sem risco de degradação térmica do CAP, atendendo ao objetivo do projeto de evitar superaquecimento e preservando as propriedades do material.

Figura 23 – Imagem térmica do aquecedor e serpentina no interior do tanque de CAP



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.3.3 Análise dos resultados obtidos

A Tabela 6 compara os valores de ΔT obtidos pelos três métodos de análise. O cálculo térmico preliminar indicou um ΔT de 18 °C, enquanto a simulação CFD apresentou 20 °C. Nos testes em protótipo, o ΔT medido foi de 15,7 °C. A diferença entre os métodos permanece pequena, o que confirma a consistência do projeto.

Método	ΔT de Temperatura (°C)
Cálculos de dimensionamento térmico	18,0
Simulação CFD	20,0
Testes protótipo	15,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Comparando os resultados numéricos e experimentais, constata-se que o modelo proposto apresenta consistência térmica e viabilidade prática. As diferenças observadas entre os valores teóricos, simulados e medidos são consideradas esperadas, uma vez que as condições reais de operação envolvem fatores que dificilmente são reproduzidos integralmente nas simulações computacionais.

Entre esses fatores, destacam-se as perdas térmicas por condução e convecção nas superfícies do tanque e das tubulações, além das variações de temperatura ambiente durante os testes, que influenciam o gradiente térmico global.

Além da comparação entre os valores de ΔT obtidos, outro aspecto relevante revelado pelo estudo é a qualidade da distribuição térmica no interior do tanque. A Figura 7, referente ao sistema Fogo Tubular, evidencia claramente regiões de superaquecimento localizadas, onde a parede do tubo submetida diretamente à chama atinge temperaturas muito acima do limite seguro para o CAP.

Por outro lado, os resultados numéricos e experimentais do sistema com serpentinas internas demonstram um comportamento muito mais uniforme, característica confirmada pelas imagens térmicas apresentadas, como na Figura 23. Nela observa-se que tanto a caldeira quanto a serpentina operam com temperaturas muito próximas, sem ocorrência de picos acentuados e sem zonas críticas de superaquecimento. Isso ocorre devido ao papel do óleo térmico como intermediário, que absorve o calor da câmara de combustão e o distribui de forma gradual e controlada ao longo de toda a serpentina.

A comparação direta entre os dois métodos permite concluir que o sistema proposto proporciona melhor distribuição térmica, maior estabilidade e baixo risco de degradação do CAP, uma vez que a temperatura que chega ao fluido apresenta variação suave e previsível. Assim, tanto as análises CFD quanto os testes em protótipo convergem para um mesmo resultado: o aquecimento indireto por serpentinas apresenta desempenho mais seguro e controlado em relação ao Fogo Tubular, reforçando a coerência do dimensionamento adotado e a adequação do modelo proposto.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento, simulação e validação de um sistema de aquecimento indireto para tanques de armazenagem de Cimento Asfáltico de Petróleo. O estudo foi conduzido de forma integrada, envolvendo o dimensionamento térmico, a análise numérica via CFD e os testes experimentais em protótipo, com o propósito de garantir o desempenho térmico e a segurança operacional do sistema.

O dimensionamento térmico permitiu estabelecer os parâmetros de projeto da caldeira e da serpentina, assegurando a capacidade de aquecimento necessária ao processo. As simulações CFD possibilitaram compreender o comportamento do escoamento e da transferência de calor nos domínios sólido e fluido, revelando boa distribuição térmica e ausência de pontos de superaquecimento, aspectos fundamentais para a preservação das propriedades físico-químicas do CAP.

Os testes experimentais realizados com o protótipo confirmaram o desempenho esperado do sistema. Observou-se uma operação estável, com aquecimento progressivo e comportamento térmico coerente com o projetado. As imagens térmicas registradas demonstraram boa uniformidade de temperatura entre a caldeira e a serpentina, sem indícios de pontos de superaquecimento.

Comparando os resultados obtidos por cálculo, simulação e teste, verificou-se coerência entre as três etapas, com variações atribuídas às perdas térmicas reais e às condições ambientais de operação. No dimensionamento térmico, estimou-se um ΔT de aproximadamente 18 °C, na simulação CFD, o modelo previu um ΔT em torno de 20 °C e nos testes experimentais, foi observado um ΔT próximo de 15,7 °C. Essas diferenças são esperadas para sistemas térmicos reais e decorrem da dissipação de calor para o ambiente, da eficiência do isolamento e das características operacionais do protótipo.

Conclui-se, portanto, que o sistema proposto cumpre os objetivos estabelecidos, apresentando desempenho adequado para aplicação no aquecimento de tanques de CAP por meio de óleo térmico. O método de aquecimento indireto mostrou-se, controlável e seguro.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de testes completos com o tanque abastecido com CAP, de modo a avaliar o comportamento térmico do material em operação real, bem como estudos voltados à otimização energética do conjunto, como a substituição do queimador por um de menor poder calorífico e o aproveitamento dos gases residuais do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, J. L. **Integração de utilidades, recuperação de calor e cogeração em sistemas de aquecimento de fluido térmico**. Monografia apresentada no curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética do Centro Federal de Educação Tecnológica – RJ, 2001/2002. Disponível em: http://www.konus.com.br/public/uploads/artigos/_542a377fbd2e4.pdf. Acesso em: 22 abr. 2025.
- BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- BICCA, G. B. **Modelagem hierárquica de trocadores de calor casco e tubos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13447/000640049.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2025.
- CAZENOVE, J. de. **Modelagem numérico-computacional e avaliação experimental do autoaquecimento de materiais viscoelásticos**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14874/1/Diss%20Jean.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- COSTA, C. A. S. **Estudo do comportamento térmico de tanques de armazenamento de asfalto**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91419>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. NORMA DNIT 031/2024 – Pavimentação – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_031_2024_es.pdf. Acesso em: 15 mar. 2025.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. NORMA 095/2006 – EM – Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dnit095_2006_em.pdf. Acesso em: 13 abr. 2025.
- EDRAL. Bomba Centrífuga EDOT32-160: catálogo online. Disponível em: <https://edral.com.br/edral/bomba-centrifuga-edot32-160.php>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- ELETROBRÁS. **Eficiência energética no uso de vapor: manual prático**. Procel Indústria. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <https://proframonsilva.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/12/manual-vapor.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- IMPORTHERM. Queimadores FBR Importherm: catálogo. Disponível em: <https://importherm.com.br/manuais/queimadores-fbr-importherm.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- LUBRAX UTILE OT. **Lubrificante mineral para transferência de calor**. Folheto técnico. Rio de Janeiro: Lubrax, 2022. Disponível em: https://www.lubrux.com.br/sites/lubrux/files/2022-09/PT_LUBRAX_UTILE_OT.pdf. Acesso em: 10 mai. 2025.
- MEHDIZADEH, H.; ALISHAH, A.; ASTANI, S. H. **Study on performance and methods to optimize thermal oil boiler efficiency in cement industry**. *Energy Equipment and*

Systems, v. 4, n. 1, p. 53-64, 2016. Disponível em: https://www.energyequipsys.com/article_20127_8e28942a787b0c2e0e7d470aff1fb7e7.pdf. Acesso em: 7 abr. 2025.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/87049/207429.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 abr. 2025.

PINTO, G. V. da S.; SANTANA, E. L. P. **Algoritmo para cálculo de eficiência térmica em caldeiras**. Revista Metropolitana de Sustentabilidade, v. 10, n. 2, p. 1-12, maio/ago. 2020. Disponível em: <https://revistasfmu.fmu.br/index.php/rms>. Acesso em: 11 abr. 2025.

PIZZORNO, B. de S. **Efeito do solvente e da temperatura na morfologia superficial do cimento asfáltico de petróleo (CAP)**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/BiancaDeSousaPizzorno.pdf. Acesso em: 13 mar. 2025.

READ, J.; WHITEHEAD, D. **The Shell Bitumen Handbook. 5. ed. Shell Bitumen**, 2023. Disponível em: <https://basekim.com/wp-content/uploads/2023/07/the-shell-bitumen-handbook.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

ROHDE, L. **Estudo sobre o comportamento de misturas asfálticas com CAP modificado para pavimentação**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12577/000628727.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2025.

SENGER, R. **Análise do rendimento térmico de uma caldeira alimentada com lenha em toras**. 2015. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16343/3/PG_DAMEC_2015_12.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.

SILVA JÚNIOR, J. de A. da. **Análise de um trocador de calor tipo serpentina de uma planta de hipoclorito de sódio**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/0212edda-8daa-4702-be95-813267184c30/content>. Acesso em: 19 abr. 2025.

SPECHT, L. P.; BORGES, P. A. P.; HELLMANN, L. **Determinação das propriedades térmicas de concretos asfálticos com diferentes tipos de ligantes**. Revista Tecnologia, v. 29, n. 2, 2008. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/37>. Acesso em: 13 abr. 2025.

TONIAL, I. A. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos**. 2001. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/IlonirAntonioTonial.pdf. Acesso em: 13 abr. 2025.

VALDERRAMA, G. S. **O impacto da Emenda Constitucional nº 95/2016 no investimento público federal em infraestrutura de transporte rodoviário**. Repositório Institucional da

Escola Nacional de Administração Pública (ENAP), 2020. Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/8524/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Gabriel%20Valderrama%20Vers%C3%A3o%20Final%20P%C3%B3s%20banca_corrigido_com_ficha_catalografica.pdf. Acesso em: 21 mar. 2025.

VAKKILAINEN, E. K.; AHTILA, P. **Modern method to determine recovery boiler efficiency**. *O Papel*, v. 72, n. 12, p. 58-65, 05 dez. 2011. Disponível em: https://newspulpaper.com/wp-content/uploads/2023/08/1359377111_7bc48fa8b7e072c7a6520423b6eeddf1_1138265000.pdf. Acesso em: 7 abr. 2025.

URBANO, J. J. **Estudo numérico do processo de calcinação da gipsita em fornos rotativos com aquecimento indireto a óleo**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/13255/1/Tese%20Jos%c3%a9%20Junio%20Urbano.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2025.

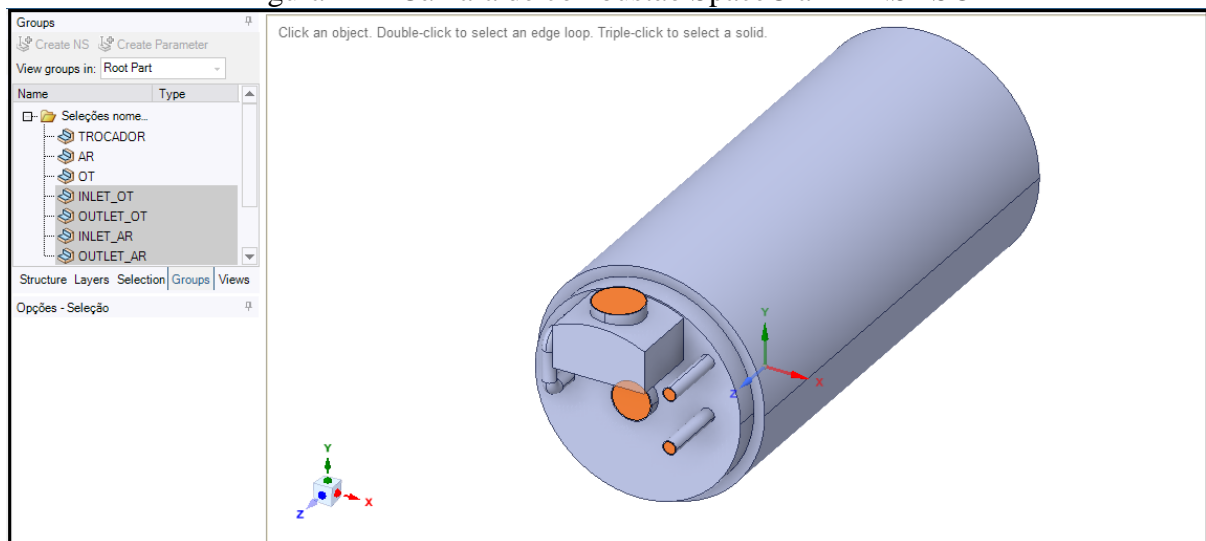
YANG, Z.; ZHANG, X.; ZHANG, Z.; ZOU, B.; ZHU, Z.; LU, G.; XU, W.; YU, J.; YU, H. **Effect of Aging on Chemical and Rheological Properties of Bitumen**. *Polymers*, v. 10, n. 12, p. 1-16, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym10121345>. Acesso em: 14 abr. 2025.

APÊNDICE A

Modelos utilizados na simulação

Os modelos tridimensionais empregados na simulação foram desenvolvidos e editados no ambiente *SpaceClaim*, do software ANSYS®. Nessa etapa, foram definidos os volumes representativos dos gases de combustão, do óleo térmico e do CAP, assegurando a correta caracterização física dos domínios de interesse. A Figura A1, apresenta o modelo da câmara de combustão.

Figura A1 - Câmara de combustão SpaceClain ANSYS®

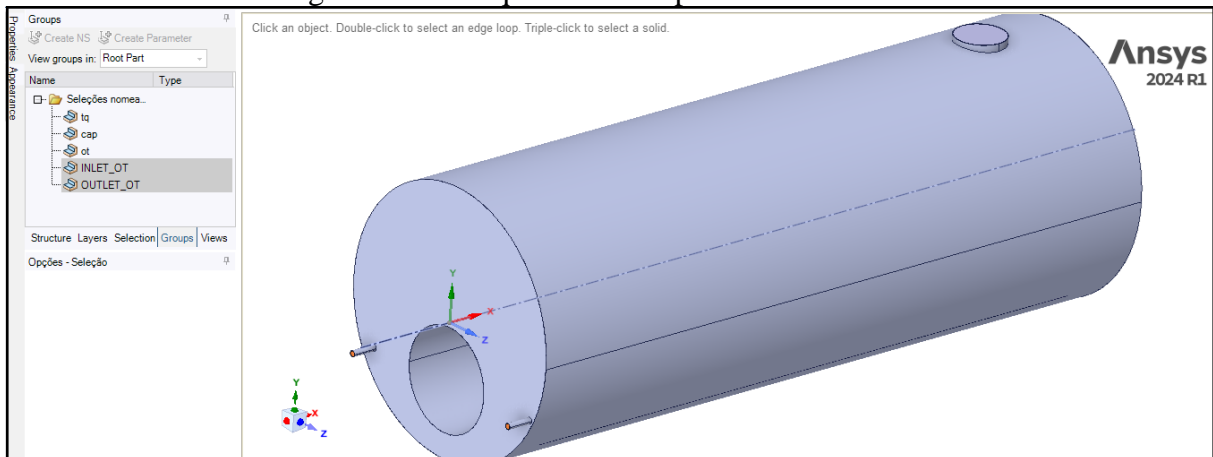


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura A1 apresenta as entradas e saídas da câmara de combustão, de modo a reproduzir as condições operacionais reais, incluindo trajetórias de escoamento, pontos de injeção de óleo térmico, coletores de retorno e chaminé.

A Figura A2 mostra as entradas e saídas do tanque de CAP. Foram configuradas as trajetórias de escoamento do óleo térmico pela serpentina, bem como os pontos de entrada e saída do fluido.

Figura A2 – Tanque de CAP SpaceClain ANSYS®



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Escopo e estratégia de simulação

Foram executadas duas simulações principais e complementares no software ANSYS® CFX. A primeira simulação, consistiu em analisar o sistema de aquecimento, composto pela caldeira e pelo queimador, de forma isolada, sem acoplar o tanque de CAP. Nesse modelo são representados a câmara de combustão e os volumes de óleo térmico envolvidos no circuito da caldeira. O resultado esperado é a determinação da taxa líquida de calor efetivamente transferida ao fluido térmico.

Na segunda simulação, avaliou-se diretamente o escoamento do óleo térmico aquecido pela serpentina instalada no interior do tanque de CAP. Nessa etapa, buscou-se determinar a taxa de calor transferida ao ligante asfáltico, mapear os campos de temperatura tanto no fluido armazenado quanto no casco do tanque e estimar o tempo necessário para que a temperatura atinja o valor de projeto.

A comparação entre os resultados das duas simulações permite identificar ganhos e perdas ao longo do sistema. Enquanto a primeira simulação indica o calor útil entregue ao óleo térmico, a segunda mostra quanto dessa energia é realmente transferida ao CAP. Dessa forma, torna-se possível verificar se o dimensionamento térmico está adequado às metas de aquecimento, garantindo maior confiabilidade no desempenho do sistema.

Metodologia de modelagem

A metodologia proposta busca equilibrar a fidelidade física do modelo com o custo computacional. O escoamento é tratado como incompressível, com transferência de calor

conjugada (CHT) nos sólidos. Para descrever a turbulência, adotou-se o modelo RANS. As propriedades termofísicas do óleo térmico e do CAP são definidas conforme as faixas reais de operação, com dependência da temperatura para grandezas como densidade (ρ), viscosidade (μ), condutividade térmica (k) e calor específico (cp).

A geração de malha prioriza o refinamento nas camadas, nas regiões com elevados gradientes térmicos e serpentinas. Quanto à convergência, são adotados critérios rigorosos como, resíduos alvo iguais ou inferiores a 10^{-4} , fechamento do balanço energético com erro de no máximo 1–3% e estabilidade dos parâmetros monitorados ao longo das iterações.

Criação da malha

A geração da malha foi realizada no módulo ANSYS® *Meshing*, buscando equilibrar precisão numérica e custo computacional. Foram utilizados elementos tetraédricos devido à geometria complexa do tanque de CAP e das serpentinas internas, permitindo melhor adaptação às superfícies curvas. O refinamento da malha foi concentrado nas regiões de maior gradiente térmico e de velocidade, como as superfícies de troca de calor entre o fluido e o CAP.

Seleção do tipo de elementos

Devido à complexidade da geometria, adotou-se o método *Patch Conforming Tetrahedrons* como abordagem principal para os volumes de fluido e sólido, garantindo flexibilidade na adaptação às superfícies curvas das serpentinas e do casco.

Nas regiões de paredes em contato com os fluidos (óleo térmico e CAP), foram aplicadas camadas prismáticas (*inflation layers*) com o objetivo de capturar adequadamente os gradientes térmicos e de velocidade próximos às superfícies. Foram utilizadas camadas prismáticas, com taxa de crescimento de 1,2 entre camadas consecutivas, de forma a garantir a transição suave entre a zona próxima à parede e o volume central.

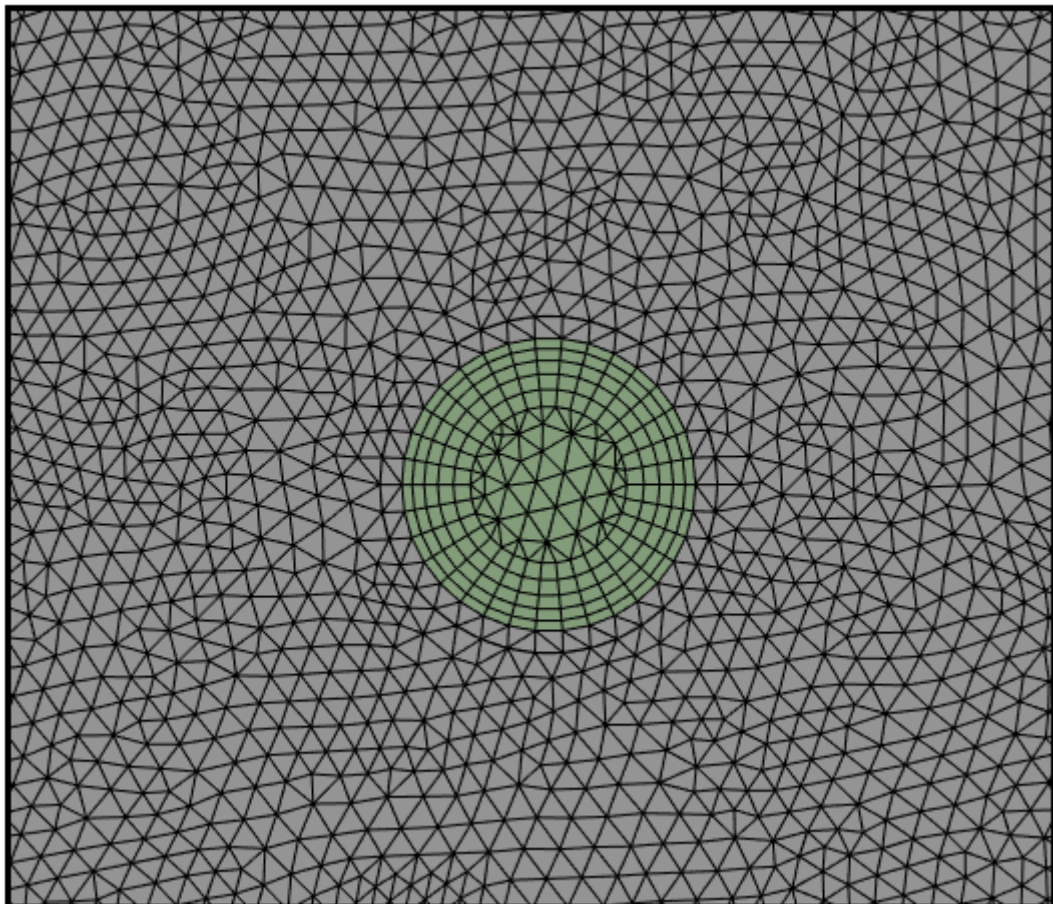
Refinamento localizado da malha

Para garantir maior precisão nos resultados, foram aplicados refinamentos locais em três regiões principais:

- superfície externa das serpentinas: região crítica de troca térmica indireta entre o óleo térmico e o CAP;
- parede interna do tanque: área de contato direto com o CAP, importante para avaliar gradientes térmicos e pontos de possível superaquecimento;
- câmara de combustão: zona de maior fluxo de energia térmica, onde a correta captura dos gradientes é fundamental para estimar a transferência de calor ao óleo.

A Figura A3 ilustra o refinamento aplicado nas interfaces entre o óleo térmico, a parede metálica da serpentina e o CAP, no centro da figura, há um círculo verde com camadas concêntricas bem definidas, indicando a aplicação de *inflation layers* ao redor de uma parede cilíndrica. Já a região cinza ao redor apresenta elementos triangulares de tamanho progressivamente maior à medida que se afastam do cilindro, evidenciando a utilização de refinamento localizado.

Figura A3 – Malha com camadas prismáticas ANSYS®



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Critérios de qualidade da malha

A qualidade da malha foi avaliada com base nos parâmetros *Skewness*, *Aspect Ratio* e *Orthogonal Quality*, conforme as boas práticas de CFD. Os valores obtidos ficaram dentro das seguintes faixas:

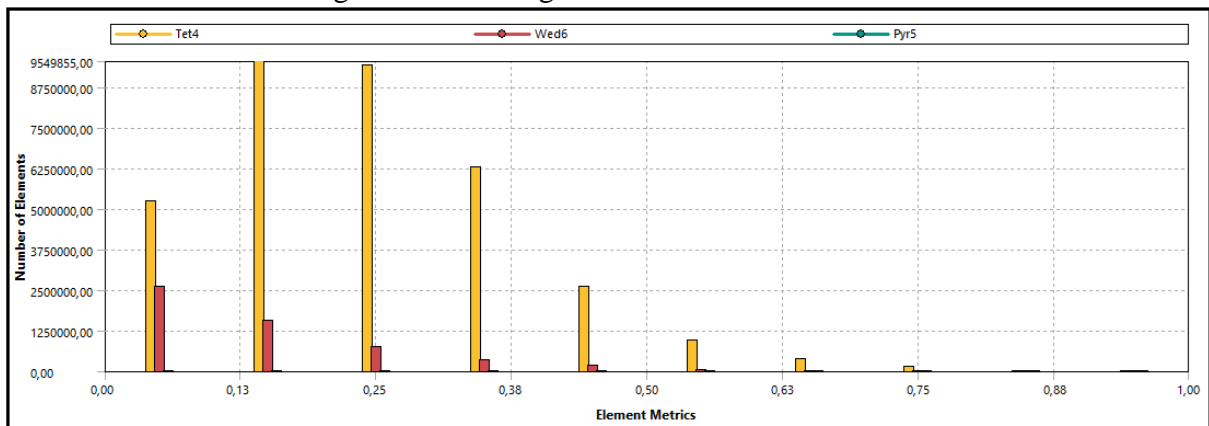
Skewness: valores médios inferiores a 0,38, com máximo em torno de 0,75, considerados aceitáveis para malhas tetraédricas.

Aspect Ratio: inferior a 5 na maior parte dos elementos, com valores locais máximos de 12 apenas em regiões de difícil discretização.

Orthogonal Quality: superior a 0,2 em todos os elementos, com média de 0,78, indicando boa ortogonalidade da malha.

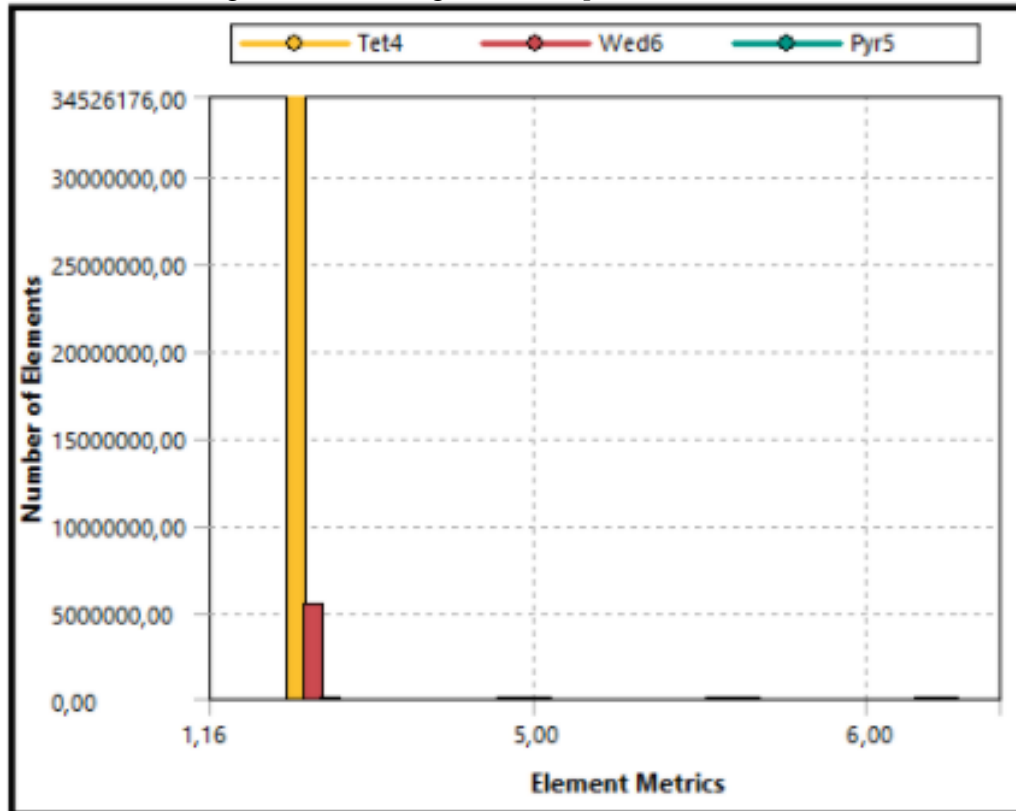
A Figura A4 apresenta o histograma gerado no módulo ANSYS® *Meshing*, evidenciando que a maior parte dos elementos tetraédricos apresenta *skewness* inferior a 0,38, o que garante boa qualidade de discretização. Elementos com *skewness* superior a 0,75 representam menos de 1% do total, não comprometendo a estabilidade numérica da solução.

Figura A4 – Histograma de *Skewness* da malha



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura A5 apresenta o histograma de *aspect ratio* da malha gerado no ANSYS® *Meshing*. É possível observar que a maior parte dos elementos apresenta *aspect ratio* inferior a 5, o que está dentro das recomendações para análises de CFD.

Figura A5 – Histograma de *aspect ratio* da malha

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)