



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS SALES SANTANA ANDRADE

**ANÁLISE TÉCNICA-ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DE ISOLAMENTO
TÉRMICO DE ALTA TEMPERATURA NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

Recife
2025

LUCAS SALES SANTANA ANDRADE

**ANÁLISE TÉCNICA-ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DE ISOLAMENTO
TÉRMICO DE ALTA TEMPERATURA NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia mecânica.

Orientador (a): Profa. Dra. Janaina Moreira de Meneses.

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Andrade, Lucas Sales Santana .

Análise técnica-econômica da substituição de isolamento térmico de alta temperatura na indústria petroquímica / Lucas Sales Santana Andrade. - Recife, 2025.

61 p., tab.

Orientador(a): Janaina Moreira de Meneses

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, anexos.

1. Isolamento térmico. 2. Engenharia de custos. 3. Análise técnica - econômica. I. Meneses, Janaina Moreira de . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Ao 13º dia do mês de outubro do ano de dois mil e vinte e cinco, às 13:30 horas, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado **ANÁLISE TÉCNICA-ECONÔMICA DA SUBSTITUIÇÃO DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE ALTA TEMPERATURA NA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA**, elaborado pelo aluno **Lucas Sales Santana Andrade**, matrícula 20140002247, sob a orientação da Profa. **Janaina Moreira de Meneses**. A banca foi composta pelos avaliadores: Profa. **Janaina Moreira de Meneses** (orientadora), Profa. **Marcela Elisa Fontana** (avaliadora) e Prof. **Justo Emilio Alvarez Jacobo** (avaliador). Após a exposição oral do trabalho, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela sua APROVAÇÃO, atribuindo-lhe a média 8,0, julgando-o apto~~X~~ / inapto() à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada pelos membros da banca.

Orientadora: Profa. Janaina Moreira de Meneses Nota: 8,0

Assinatura

Avaliadora: Profa. Marcela Elisa Fontana Nota: 8,0
Interna

Assinatura

Avaliador: Prof. Justo Emilio Alvarez Jacobo Nota: 8,0
Interno

Assinatura

Recife, 07 de outubro de 2025.

Prof. Marcus Costa de Araújo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de curso - TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Dedico esse trabalho à memória de minha avó, Elisa. Sua presença alegre, seu carinho silencioso e sua fé inabalável permanecem presentes mesmo após a sua partida, sobretudo, em um último gesto de amor: aquele bilhete, escondido na minha gaveta, no qual me revelava seu maior desejo que era me ver formado. Desde então, cada passo nesta caminhada foi também por ela, por seu sonho que agora se concretizou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sua infinita bondade, e por ter me resgatado, permitindo a restituição do curso e fortalecendo minha fé ao longo desta caminhada.

À minha noiva, Alice, pelo amor, paciência e apoio em cada etapa desta jornada. Sua presença foi essencial para que eu tivesse forças para seguir em frente.

Às professoras Janaina e Marcelle, pelo direcionamento, dedicação e incentivo constante para a construção deste trabalho.

Aos meus colegas de profissão que, por diferentes razões da vida, não puderam concluir sua jornada acadêmica. Dedico também a eles esta conquista, como lembrança de que cada esforço tem valor e que, de alguma forma, seguimos aprendendo uns com os outros.

E agradeço também a mim mesmo, por não desistir, e por enfrentar todos os desafios com resiliência até alcançar esta vitória.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar técnica e economicamente a substituição do isolamento térmico de alta temperatura em sistemas industriais, exerce papel essencial na eficiência energética, segurança operacional e controle de emissões em plantas petroquímicas, considerando o desempenho dos materiais e as dimensões econômicas associadas. A metodologia adotada baseou-se no método de custeio por atividades ABC (Activity-Based Costing), aplicado à comparação entre dois isolantes térmicos flexíveis. O estudo foi conduzido em uma planta petroquímica nacional, envolvendo equipamentos operando em temperaturas de até 600 °C, como tubulações, válvulas, tanques, vasos de pressão e trocadores de calor, com horizonte de análise de 48 meses. Os resultados demonstraram diferenças significativas no desempenho térmico, na durabilidade e nos custos de substituição entre os materiais analisados, evidenciando o potencial técnico e econômico do aerogel em aplicações críticas. A integração entre engenharia de custos e análise técnica é fundamental para o aperfeiçoamento do processo de manutenção industrial, fornecendo subsídios para a tomada de decisão quanto à seleção de materiais isolantes em sistemas térmicos de alta temperatura.

Palavras-chave: isolamento térmico, engenharia de custos, análise técnica-econômica.

ABSTRACT

This study aimed to conduct a technical and economic analysis of high-temperature thermal insulation replacement in industrial systems, which plays a key role in energy efficiency, operational safety, and emissions control in petrochemical plants. The adopted methodology was based on the Activity-Based Costing (ABC) approach, applied to the comparison between two flexible thermal insulation materials. The research was carried out in a national petrochemical plant, encompassing equipment operating at temperatures up to 600 °C, including pipelines, valves, tanks, pressure vessels, and heat exchangers, within a 48-month analysis period. The results revealed significant differences in thermal performance, durability, and replacement costs between the materials, highlighting the technical and economic potential of aerogel for critical applications. The integration of cost engineering and technical analysis proved essential for improving industrial maintenance processes, supporting decision-making in the selection of insulation materials for high-temperature thermal systems.

Keywords: thermal insulation, cost engineering, technical-economic analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - manta de lã de rocha	7
Figura 2 - manta de aerogel	8
Figura 3 - espessura econômica do isolamento térmico	10
Figura 4 - fluxograma das atividades desenvolvidas.....	17
Figura 5 - fluxograma do processo de análise técnica-econômica da substituição do isolamento térmico de alta temperatura	22

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Recomendações práticas para escolha da modalidade de contratação .	12
Quadro 2 - Comparativo entre os isolantes térmicos estudados	25
Quadro 3 - Mão de obra necessária do estudo de caso.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Isolantes térmicos estudados e respectivas características	30
Tabela 2 - Vida útil estimada dos Isolantes térmicos estudos	32
Tabela 3 - Custo unitário de aquisição dos isolantes térmicos estudados	34
Tabela 4 - Custo total de aquisição dos isolantes térmicos.....	34
Tabela 5 - Esforço necessário por atividade	34
Tabela 6 - Custo por hora da mão de obra	35
Tabela 7 - Composição das equipes por atividade.....	35
Tabela 8 - Custo dos recursos diretos e indiretos	37
Tabela 9 – Custo unitário por atividade.....	38
Tabela 10 - Custo total por atividade no cenário conservador	38
Tabela 11 - Custo total no cenário flexível	38
Tabela 12 - Custo total do cenário conservador.....	39
Tabela 13 - Custo total do cenário flexível	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.2 JUSTIFICATIVAS	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA ISOLAMENTOS TÉRMICOS	4
2.2 ISOLAMENTO TÉRMICO E ESPESSURA ECONÔMICA.....	6
2.3 CONCEITOS BÁSICOS DE ENGENHARIA DE CUSTOS	10
2.4 CUSTEIO E ORÇAMENTO BASEADO EM ATIVIDADES	12
3 METODOLOGIA	16
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	16
3.2 ETAPAS DA PESQUISA E COLETA DE DADOS	16
3.2.1 Revisão bibliográfica e normativa.....	17
3.2.2 Mapeamento do processo de substituição do isolamento térmico	18
3.2.3 Quantificar e classificar os custos associados à substituição do isolante térmico	19
3.2.4 Catalogar dados reais de aquisição dos isolantes térmicos	21
3.2.5 Relacionar embasamentos técnicos, econômicos e operacionais para tomada de decisão sobre a substituição do isolante.....	21
3.2.6 Propor recomendações práticas para gestão de custo	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 DADOS DO ESTUDO DE CASO.....	24
4.2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E NORMATIVO.....	27
4.3 MAPEAMENTO DO PROCESSO DE SUBSTITUIÇÃO	28
4.4 QUANTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS CUSTOS.....	29
4.3 ANÁLISE TÉCNICA.....	30
4.3 ANÁLISE ECONÔMICA	33

5 CONCLUSÕES GERAIS	41
5.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	41
5.2 LIMITAÇÕES E FUTUROS TRABALHOS.....	42
ANEXO A - MONTAGEM DO ISOLAMENTO TÉRMICO EM TUBULAÇÕES.....	46
ANEXO B - MONTAGEM DO ISOLAMENTO TÉRMICO EM VÁLVULAS	47
ANEXO C - MONTAGEM DO ISOLANTE EM TROCADORES DE CALOR.....	48
ANEXO D - MONTAGEM DO ISOLANTE EM VASOS DE PRESSÃO.....	49

1 INTRODUÇÃO

A busca por eficiência energética, segurança operacional e otimização de recursos tem levado indústrias de diversos setores a investirem em boas práticas de manutenção que garantam a confiabilidade e o desempenho de seus sistemas energéticos. Lima (2018) propõe, que, dentre essas práticas, a substituição de isolamento térmico em equipamentos e tubulações que operam em altas temperaturas destaca-se como uma atividade estratégica, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. O isolante térmico é essencial para garantir a eficiência energética, a segurança operacional e a proteção de ativos industriais.

A literatura destaca que a especificação técnica adequada, aliada a uma instalação e manutenção corretas do isolamento térmico, exerce influência significativa sobre o desempenho operacional e a economia do processo industrial Milcent (2007).

No campo da engenharia de custos, Martins (2010) também enfatiza a importância da distinção entre custos diretos e indiretos como elemento essencial para a elaboração orçamentária precisa e para uma gestão eficiente dos recursos.

As normas N-250 (PETROBRAS, 2017) e N-550 (PETROBRAS, 2021) reforçam a importância de critérios técnicos bem definidos na escolha dos materiais e na execução da substituição do isolamento térmico de alta temperatura em petroquímicas. A adoção dessas diretrizes contribui para a padronização das práticas, a prevenção de falhas e a redução dos riscos, além de garantir condições adequadas de operação e segurança ocupacional.

A realidade observada nas indústrias mostra que decisões aparentemente simples, como a aplicação de proteção contra intempéries ou a escolha adequada do material isolante, podem influenciar significativamente o custo final da manutenção do isolamento térmico. Neste contexto, este trabalho explora os fundamentos do isolamento térmico industrial de alta temperatura, integrando conceitos de engenharia de custos e análise técnico-econômica para avaliar o impacto operacional e financeiro da substituição desses sistemas em unidades petroquímicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar técnica e economicamente a substituição do isolamento térmico de alta temperatura em sistemas da indústria petroquímica, considerando desempenho dos materiais e dimensões econômicas, com foco na eficiência operacional e sustentabilidade da manutenção.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para se alcançar o objetivo geral, será necessário atingir os seguintes objetivos específicos:

- a) Selecionar os principais materiais isolantes flexíveis utilizados em aplicações de alta temperatura destacando suas propriedades;
- b) Avaliar as mudanças necessárias (atividades) relacionadas a troca do isolante térmico existente;
- c) Quantificar e classificar os custos associados à substituição do isolamento térmico;
- d) Catalogar dados reais de valores de aquisição dos isolantes térmicos, (mão de obra e ferramental necessário);
- e) Listar os embasamentos técnicos para tomada de decisão sobre a seleção do tipo de isolante;
- f) Propor recomendações práticas para gestão de custos.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Embora a prática do isolamento térmico esteja consolidada em projetos industriais, ainda são escassos os estudos que integram o custo de execução com os requisitos normativos, os critérios de desempenho dos materiais e as modalidades contratuais adotadas. Júnior (2016) corrobora que frequentemente, decisões mal fundamentadas sobre a substituição dos isolantes impactam o desempenho térmico, o orçamento da manutenção e até a segurança operacional em ambientes petroquímicos, que operam sob condições extremas de temperatura.

Quantificar os ganhos energéticos e a economia real gerada por uma substituição bem planejada ainda é um desafio na indústria petroquímica, segundo Bastos (2019). Os custos indiretos da manutenção do isolamento térmico são subestimados ou pouco transparentes, o que compromete a previsão dos custos, a escolha inadequada do material isolante pode gerar distorções orçamentárias, retrabalhos e conflitos entre o planejamento e a operação.

Silva (2018) afirma que no setor petroquímico, por exemplo, falhas no isolamento podem resultar em perdas térmicas significativas, aumento no consumo de energia, redução da vida útil dos equipamentos e riscos à integridade física de trabalhadores. Diante desses impactos, torna-se indispensável uma abordagem criteriosa na análise dos custos envolvidos na substituição do material isolante de alta temperatura.

Este trabalho é justificado, pela necessidade de compreensão da engenharia de custos aplicada à manutenção industrial, e da gestão estratégica na substituição de isolamento térmico, além de gerar economia no médio e longo prazo dos sistemas térmicos. Também alinhada aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da ONU, o ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura) e o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis), ao propor a gestão sustentável de recursos industriais, o uso eficiente de energia e redução de perdas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR PARA ISOLAMENTOS TÉRMICOS

De acordo com Incropera (2008), a transferência de calor é um fenômeno que ocorre sempre que há uma diferença de temperatura entre dois meios, resultando no fluxo de energia térmica do meio mais quente para o mais frio. Esse mecanismo, essencial em sistemas térmicos industriais, representa a movimentação de energia provocada por um gradiente térmico, sendo determinante para o desempenho e controle de processos envolvendo aquecimento ou resfriamento.

Cengel (2009) também reforça que existem três principais mecanismos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Todos dependem da existência de uma diferença de temperatura e ocorrem com o fluxo de calor do meio mais quente para o mais frio. Esse fluxo é definido como a quantidade de calor transferido por unidade de área e pode ser classificado em duas condições operacionais: regime permanente, no qual as propriedades do sistema não variam com o tempo, e regime transiente, em que há variações temporais nas propriedades térmicas.

Sempre que um sistema opera em temperatura diferente do ambiente, ocorrem trocas de calor que provocam variações térmicas e perdas de energia. Para minimizar esses efeitos, aplica-se uma camada de material com baixa condutividade térmica sobre as superfícies expostas. A condutividade térmica, de acordo com Cengel (2009), é uma propriedade de um material que indica a sua capacidade de conduzir calor.

Apesar de existirem valores de referência em literatura técnica, a condutividade térmica deve ser verificada diretamente com o fabricante, pois é influenciada por fatores como temperatura de serviço, umidade absorvida e envelhecimento do material. Para definir quantitativamente a condutividade térmica de um meio podemos usar umas das equações fundamentais da transferência do calor bem descrita por Jean B. J. Fourier. A fórmula de cálculo para a condutividade térmica, aplica-se a Equação 1.

$$\dot{Q}_{cond} = -k.A.\frac{dt}{dx} \quad (1)$$

Onde nas condições de regime permanente, a equação 1 pode ser simplificada como na Equação 2:

$$\dot{Q}_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (2)$$

Onde \dot{Q}_{cond} é a taxa de calor transferido por condução (W), k é a condutividade térmica (W.m.K), ΔT é a diferença de temperatura entre superfícies (K), L é a distância entre as superfícies (m) e A é a área de superfície (m²). Doná (2018) esclarece que devido à passagem decrescente da temperatura, que torna o gradiente temperatura negativo, o sinal negativo na equação garante transferência de calor seja positiva. A condutividade térmica é a medida da capacidade que um material tem de conduzir calor.

A convecção pode ser classificada com base na forma como o escoamento do fluido é gerado. Conforme Incropera (2008), denomina-se convecção forçada quando o movimento do fluido é induzido por agentes externos, como ventiladores ou bombas; e convecção natural quando o escoamento ocorre devido à variação de densidade provocada por diferenças de temperatura no fluido. Çengel (2009) reforça que, a taxa de transferência de calor por convecção é determinada pela lei de resfriamento de Newton, que fornece a expressão matemática para quantificar esse processo térmico, apresentada na equação 3.

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (3)$$

Onde \dot{Q}_{conv} é a taxa de calor transferido por convecção (W), h é o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m².K), A_s é a área de superfície (m²), T_s e T_{∞} são, respectivamente, as temperaturas da superfície e do fluido (K)

Conforme detalhado por Çengel (2009), o coeficiente de transferência de calor por convecção não pode ser tratado como uma propriedade intrínseca do fluido. Seu valor depende de uma série de fatores que influenciam o processo convectivo, incluindo as características do escoamento, a geometria da superfície de troca térmica, bem como as condições de contorno envolvidas.

Incropera (2008) explica que, em sistemas compostos por múltiplas camadas de materiais, a transferência de calor pode ser representada por uma analogia com circuitos elétricos, utilizando o conceito de resistências térmicas em série ou em paralelo. Essa modelagem considera a condução unidimensional, a ausência de geração interna de calor e propriedades térmicas constantes ao longo do sistema.

Nessa abordagem, as resistências térmicas associadas à condução e à convecção são definidas de forma específica para cada mecanismo, apresentadas nas equações 4 e 5.

$$R_{t,cond} = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\dot{Q}_{cond}} = \frac{L}{kA} \quad (4)$$

$$R_{t,conv} = \frac{(T_s - T_\infty)}{\dot{Q}_{conv}} = \frac{L}{hA_s} \quad (5)$$

No qual, L é a distância entre duas superfícies que compõe a parede, no caso a largura, e A é a área da superfície perpendicular a essa largura composta pelo mesmo material, k é a condutividade térmica do material que compõe a seção A por L . Com essas equações pode-se definir que a equivalência de todas as resistências térmicas em uma parede, sendo essa a resistência total.

2.2 ISOLAMENTO TÉRMICO E ESPESSURA ECONÔMICA

O isolante térmico atua como uma resistência, reduzindo a transferência de calor, principalmente por convecção. Ele impede ou dificulta a passagem de calor entre dois ambientes com temperaturas diferentes. Além da baixa condutividade, um bom isolante térmico deve apresentar resistência à fusão e combustão, não ser tóxico, possuir boa relação custo-benefício, ser fácil de aplicar, resistente a agentes químicos e intempéries, e apresentar estabilidade mecânica ao longo do tempo. Sá (2017) fala que “quanto menor for a condutividade térmica e maior a espessura do material, mais eficaz será o isolamento térmico”.

Isolantes térmicos são constituídos por materiais de baixa condutividade térmica combinados para obter uma condutividade térmica do sistema ainda menor, segundo Incropera (2008). Nos isolantes tradicionais do tipo fibras, pós, ou flocos, o material sólido encontra-se finamente disperso em um espaço de ar. Entende-se como isolamento rígido isolantes térmicos rígidos peças pré-moldadas fornecidas nas formas de segmentos, calhas, placas e peças especiais, já as peças conformáveis fornecidas nas formas de feltros, painéis, tubos flexíveis, mantas, flocos, cordas, são caracterizadas como isolamento térmico flexível.

A lã de rocha é um isolante térmico fibroso amplamente utilizado na indústria, obtido a partir da fusão de rochas basálticas e outros minerais em altas temperaturas.

Essa fusão gera fibras entrelaçadas que conferem ao material excelente desempenho térmico, acústico e resistência ao fogo, Souza (2024). Na indústria petroquímica, é frequentemente aplicada em sistemas sujeitos a temperaturas superiores a 600 °C, como tubulações, caldeiras e tanques. Suas principais vantagens incluem o bom desempenho térmico, o baixo custo relativo e a facilidade de aplicação e manutenção.

Figura 1 - Manta de lã de rocha



Fonte: Milcent (2007, p. 64)

O aerogel, por sua vez, é um material isolante de última geração, reconhecido por sua baixa condutividade térmica, considerada uma das menores entre os materiais isolantes sólidos. Composto geralmente por sílica, o aerogel possui uma estrutura nanoporosa que confere alta eficiência mesmo em espessuras reduzidas. Essa característica o torna especialmente vantajoso em áreas com restrições de espaço ou onde se exige máxima performance térmica com peso mínimo. Nos últimos anos os aerogéis, em especial os aerogéis de sílica, têm despertado um grande interesse em função das excelentes propriedades que apresentam, fazendo destes materiais aplicáveis numa imensa variedade de áreas tecnológicas. São materiais nano porosos de elevada porosidade (com cerca de 80 % a 99 % de porosidade), resultando numa densidade muito baixa, segundo Fernandes (2018).

Figura 2 - Manta de aerogel



Fonte: Fernandes (2018, p. 37)

Ambos os materiais são incombustíveis, contribuindo para a segurança em ambientes industriais de alta temperatura. Segundo Montegutti (2016), A aplicação adequada do isolamento térmico é essencial para proteger pessoas e equipamentos, garantindo a continuidade segura e estável dos processos industriais. O controle térmico eficiente aumenta a produtividade e contribui para a redução do consumo de energia, o que, por consequência, representa economia financeira.

Conforme a descrição, também proposta pelo autor, o isolamento térmico requerido na indústria é usado basicamente pelas razões:

- Proteção de pessoas e equipamentos;
- Controle do processo;
- Economia de energia.

A aplicação de isolantes deve ser vista como uma ferramenta fundamental na racionalização do uso de energia, nas instalações industriais como tubulações e superfícies externas dos equipamentos. A redução das perdas de calor por meio do isolamento é uma medida prática e eficaz para alcançar economias significativas de energia. Em um cenário onde os custos operacionais são crescentes, o correto dimensionamento do isolamento térmico torna-se uma estratégia indispensável.

Por isso, é imprescindível calcular com precisão a espessura e o tipo de isolante mais adequado para cada aplicação. Em equipamentos que operam com calor elevado, as perdas térmicas por radiação são frequentes e podem ser minimizadas com a escolha criteriosa dos materiais isolantes. Quando uma tubulação transporta um fluido em temperatura inferior à do ambiente, ocorre ganho de calor pelo fluido. No

caso contrário, em que o fluido está mais quente que o meio externo, há perda de calor para o ambiente. Segundo Milcent (2007) esse fenômeno representa não apenas um desequilíbrio térmico, mas também desperdício energético e financeiro.

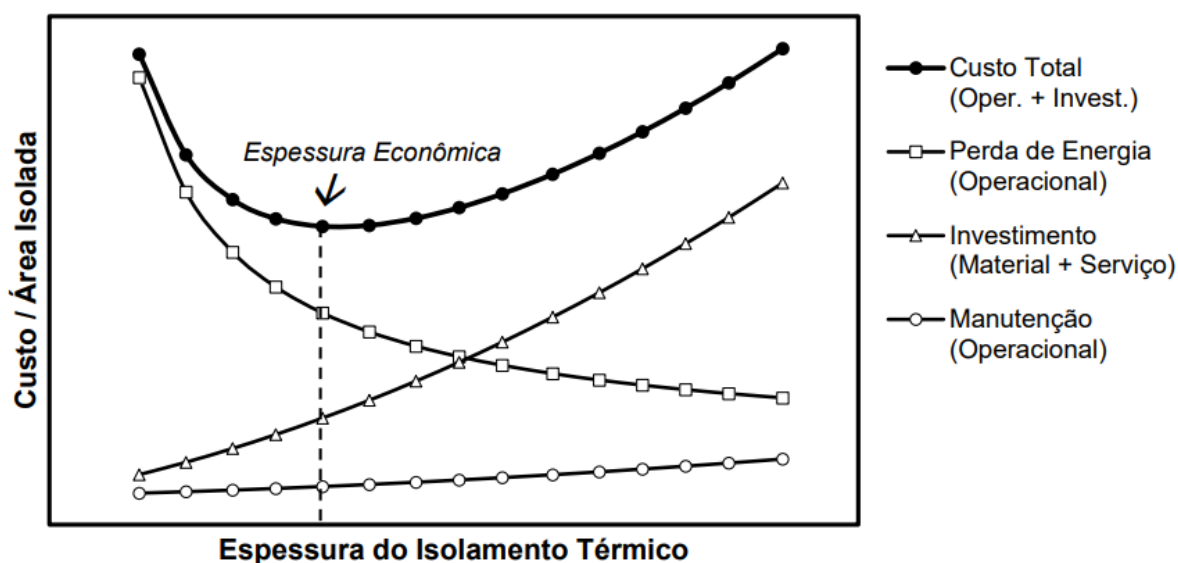
Para minimizar essas trocas térmicas indesejadas e preservar a temperatura do fluido, aplica-se isolamento térmico às tubulações. Em linhas de condução de fluidos quentes, o aumento da espessura do isolamento reduz significativamente a perda de calor. Se considerada apenas essa variável, poder-se-ia concluir que uma espessura infinita de isolamento seria ideal para eliminar totalmente as perdas térmicas. Contudo, o isolamento também representa um custo de investimento inicial, que deve ser recuperado ao longo da operação do sistema, dentro de um período de amortização aceitável. Conforme proposto por Milcent (2007) esse período pode estar limitado à vida útil do próprio isolamento ou da instalação industrial.

À medida que a espessura do isolamento aumenta, os custos de mão de obra, material, instalação e acabamento também crescem. Por outro lado, as perdas de calor diminuem. Essas duas curvas do custo do isolamento, e custo da perda térmica, se comportam de forma inversamente proporcional.

Ramos (1999) apresenta a espessura econômica como aquela que resulta no menor custo total, considerando um determinado intervalo de operação, fundamento também reforçado por Camargo (2023), esclarecendo que o aumento da espessura do isolamento em paredes nem sempre resulta em redução da transferência de calor, em algumas situações, pode até intensificá-la, tornando-as economicamente inviável.

Esse ponto não necessariamente coincide com a interseção entre as curvas individuais de custo, mas representa o equilíbrio financeiro ideal entre eficiência térmica e viabilidade econômica, detalhado na Figura 3.

Figura 3 - Espessura econômica do isolamento térmico



Fonte: Petrobras (2021, p. 11)

2.3 CONCEITOS BÁSICOS DE ENGENHARIA DE CUSTOS

A engenharia de custos fornece os fundamentos para estimar, planejar, controlar e analisar economicamente projetos e serviços de engenharia. Dias (2003) propõe que, a precisão na estimativa dos custos depende da multidisciplinaridade e da experiência dos profissionais responsáveis pela composição orçamentária. Estes devem conhecer os recursos necessários, como qualificação profissional da mão de obra, especificação técnica dos materiais que serão aplicados, equipamentos necessários para realização do serviço, normas técnicas, relatórios e certificações essenciais para a obra. Martins (2010) também corrobora que a estimativa de custos de uma obra é uma etapa muito importante para qualquer tipo de construção, desde as pequenas e médias intervenções até as grandes paradas de manutenções industriais.

Dessa forma, as indústrias, incorporadoras e empresas de construção em geral, necessitam de um delineamento detalhado, que seja capaz de organizar, elaborar e validar as despesas, planejando os custos de um determinado empreendimento e gerindo os recursos de forma correta. A apuração dos custos das atividades é feita por meio de direcionadores, também chamados de geradores de recursos. Esses direcionadores mensuram o consumo de recursos por cada atividade, sendo essenciais para a alocação proporcional e precisa dos custos. Recursos

exclusivos são atribuídos diretamente à atividade correspondente, enquanto os compartilhados são distribuídos com base em critérios objetivos de consumo.

Struckas Filho (2024) propõe que a forma que os recursos serão consumidos impactam diretamente na alocação dos custos, pois a previsão de consumo depende diretamente da modalidade de contratação. É de extrema importância a escolha do tipo de contratação, e caberá, na maioria das vezes, a instituição, seja um órgão público ou particular esta responsabilidade. Pois, sabemos que o custo estabelecido tem fundamental influência sobre o prazo de execução e a qualidade dos serviços prestados.

De acordo com a Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993, que estabelece normas gerais sobre licitações e contratos, são admitidas as modalidades: preço global, preço unitário, empreitada integral e, em alguns contextos privados, por hora técnica.

No sistema de preço global, o serviço é contratado por valor fixo e total, adequado quando o escopo está completamente definido. Nesse modelo, o risco é assumido integralmente pelo contratado, e o cronograma físico-financeiro é a base para os pagamentos. Não há necessidade de medições detalhadas por item executado, desde que os marcos contratuais estejam claramente definidos.

No sistema por preço unitário, cada item de serviço tem valor definido por unidade de medida. Os pagamentos são realizados com base em medições periódicas e precisas. Essa modalidade oferece maior flexibilidade e controle, especialmente quando há variabilidade nas frentes de trabalho. A mão de obra pode ser remunerada por hora, dia ou mês, dependendo da natureza do contrato e da planilha apresentada.

O sistema misto combina ambas as abordagens, aplicando preço global a partes bem definidas do serviço e preços unitários aos itens variáveis, exigindo maior controle administrativo. Já o modelo por hora técnica é utilizado para mensurar serviços prestados individualmente por profissionais especializados, sendo comum em consultorias ou atividades de engenharia específicas, detalhado no quadro 1.

Quadro 1 - Recomendações práticas para escolha da modalidade de contratação

Descrição	Modalidade de contratação
Estudos de um modo geral ou de viabilidade	Preço global
Projetos básicos e executivos	Preço global ou misto
Hora técnica individual ou coletiva	Preço unitário
Consultorias ou assistência técnica	Preço unitário
Supervisão, fiscalização ou acompanhamento de obras	Preço unitário
Serviços especiais com grande incidência de mão de obra	Preço unitário
Pequenas construções (por exemplo, residências unifamiliares)	Preço unitário ou global

Fonte: Dias (2003)

2.4 CUSTEIO E ORÇAMENTO BASEADO EM ATIVIDADES

O Custeio Baseado em Atividades ABC (Activity-Based Costing) é uma metodologia de delineamento de custos desenvolvida por Robert S. Kaplan e Robin Cooper no final da década de 1980. Segundo Vanzella e Lunks (2006) Seu principal diferencial está na forma como aloca os custos, baseando-se no mapeamento detalhado das atividades executadas pela organização. Ao contrário dos métodos tradicionais de divisão, o ABC entende que os produtos não consomem diretamente os recursos da empresa, mas sim as atividades que os geram. Essa ideia também é reforçada por Al Mashkoo (2022), ao aplicar o fundamento no estudo de custos no ambiente de refinarias do oriente médio, comprovando a aplicação na indústria no cenário atual.

Essa abordagem identifica as atividades como unidades que combinam recursos humanos, materiais, tecnológicos e financeiros para entregar bens ou serviços, compostas por um conjunto de tarefas interdependentes. A partir dessa estrutura, os custos são atribuídos às atividades e, em seguida, repassados aos

produtos ou serviços com base na real utilização dos recursos. O método ABC oferece três benefícios básicos:

- Primeiro benefício: proporciona maior clareza sobre os processos, permitindo o aprimoramento contínuo das operações,
- Segundo benefício: contribui para a otimização da alocação de recursos, como mão de obra, capital e ativos,
- Terceiro benefício: aumenta a capacidade de resposta da organização ao mercado, fortalecendo sua posição competitiva.

Por outro lado, o orçamento baseado em atividades ABB (Activity-Based Budgeting) é um modelo de planejamento financeiro e operacional que organiza os recursos da organização com foco nas atividades necessárias para atingir metas estratégicas. Vanzella e Lunks (2006) aborda que diferentemente do ABC, que parte dos recursos consumidos, o ABB inicia com a definição das atividades essenciais à entrega de produtos ou serviços e, a partir delas, identifica os recursos necessários à sua execução.

Da Silva (2024) esclarece que o ABB busca determinar a carga de trabalho prevista para cada atividade e estimar os recursos exigidos para sua realização. Por exemplo, no setor de recursos humanos, a atividade de “contratar novos empregados” pode demandar 50 admissões, exigindo recursos como salários e benefícios de recrutadores, despesas com anúncios, materiais e infraestrutura para entrevistas.

Essa abordagem proporciona maior precisão na estimativa de custos e promove orçamentos baseados em projeções realistas, e não em valores históricos. Embora não dependa do uso prévio do sistema ABC, o ABB é uma extensão lógica para organizações que já o utilizam. Em ambos os casos, o suporte de sistemas de informação pode ser necessário para viabilizar sua aplicação.

A estruturação do ABB pode seguir uma metodologia dividida em três fases: contextualização, elaboração e revisão. A contextualização envolve a análise do ambiente atual, o alinhamento com o planejamento estratégico e a definição das metas orçamentárias. A elaboração compreende a estimativa detalhada das atividades e dos recursos necessários, incluindo a consolidação dos dados em um formato contábil. A revisão e aprovação verifica a consistência das projeções, corrige desvios e valida os limites de gastos estabelecidos.

Dias (2003) separa os custos em dois grandes grupos, diretos e indiretos. Os custos diretos são aqueles que podem ser atribuídos de forma objetiva e imediata a

um serviço ou produto específico, aqueles que são facilmente descritos e visíveis ao cliente, podendo ser considerados:

- Salário dos profissionais;
- Veículos leves tipo hatch, motocicletas, veículos tipo pick-ups e veículos pesados como ônibus e caminhões;
- Viagens e estadia do pessoal, hotéis, repúblicas e moradias compartilhadas;
- Ferramentas manuais básicas, de uso coletivo e especiais;
- Computadores, notebooks, softwares, impressoras e acessórios de informática;
- Gastos com comunicação: infraestrutura e acessórios de rede, cabos, roteadores wi-fi, aparelhos de telefone e rádios;
- Materiais de consumo, insumo, peças e sobressalentes;
- Respectivas contas periódicas das principais concessionárias: água, energia elétrica, internet.

Por outro lado, custos indiretos referem-se a despesas que, embora essenciais para a realização do projeto, não podem ser diretamente atribuídas a uma única atividade ou produto de forma individual. A apresentação dos custos indiretos depende da facilidade de mensuração e do nível de exigência do contratante, segundo De Abreu (2024) os custos indiretos podem ser:

- Encargos trabalhistas: Férias, décimo terceiro, licenças, INSS, FGTS, adicional (noturno, de insalubridade etc.);
- Benefícios: Plano de saúde, vale alimentação, vale-transporte, auxílios previstos em convenções coletivas de trabalho;
- Uniformes, equipamentos de proteção individual, material de segurança de uso coletivo;
- Despesas com treinamento e aprimoramento técnico da equipe;
- Despesas legais, inclusive ART - Anotação de Responsabilidade Técnica devida ao CREA (Conselho Regional de Engenharia e Agronomia);
- Seguros de responsabilidade civil ou seguro de vida coletivo.

A correta distinção entre esses dois grupos é essencial para uma gestão econômica, além de permitir análises comparativas mais precisas entre os modelos de contratação.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia aplicada nas etapas da análise técnica e econômica da substituição de isolamento térmico de alta temperatura. O presente estudo adota uma abordagem de estudo de caso em uma indústria petroquímica nacional.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Em relação ao método científico, Gil (2002) afirma que: “O método científico é conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos adotados para se atingir o conhecimento”. Visando atingir o objetivo proposto, o presente trabalho apresenta um estudo de caso. No qual consiste na análise das atividades de substituição do isolamento térmico de alta temperatura, executadas em uma unidade petroquímica.

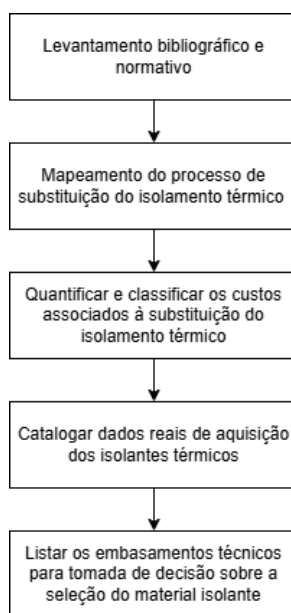
O estudo de caso é apropriado para investigar fenômenos in loco, e acontecimentos reais que tornam as características de um estudo evidentes. Sendo assim é a investigação dentro de um contexto da vida real em que os limites entre fenômeno e contexto são bem claros (Morgado, 2012).

O trabalho foi de caráter exploratório e natureza descritiva. A pesquisa também possui uma abordagem qualitativa, pois pode proporcionar uma visão e compreensão melhor do problema em que a coleta de dados é analisada de forma interpretativa possibilitando uma aproximação da fonte de coleta de dados (Teis, 2006).

3.2 ETAPAS DA PESQUISA E COLETA DE DADOS

A condução desta pesquisa foi estruturada em etapas sequenciais e interdependentes, visando assegurar a consistência metodológica e a coerência entre os objetivos propostos e os resultados obtidos. As etapas da pesquisa realizada neste trabalho, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma das atividades desenvolvidas



Fonte: Autoria própria (2025)

3.2.1 Revisão bibliográfica e normativa

Essa etapa consistiu na pesquisa de referências técnicas, normas e literatura especializada para identificar os principais materiais isolantes utilizados em aplicações de alta temperatura, com foco em propriedades como limite térmico, condutividade, resistência mecânica e durabilidade. Essa etapa forneceu o embasamento teórico para as análises técnicas, econômicas, segurança e saúde e de sustentabilidade que foram feitas posteriormente.

A obtenção dos dados necessários para a execução desta pesquisa foi realizada por meio da combinação de análise de materiais e documentações, da seguinte forma:

- Consulta a normas técnicas, tais como NBR 11626 (ABNT 2015), N-250 (PETROBRAS, 2017), N-550 (PETROBRAS, 2021) e regulamentos internos da planta petroquímica;
- Pesquisa em catálogos de fabricantes de materiais isolantes, incluindo propriedades físicas, térmicas e mecânicas;
- Consulta a manuais e guias técnicos de instalação e manutenção de isolamento térmico;
- Revisão de artigos acadêmicos, estudos de caso e relatórios técnicos sobre custos diretos e indiretos em manutenção industrial;

- Coleta de dados reais de preços de materiais isolantes, obtidos diretamente com fornecedores nacionais e internacionais, via cotações formais e consultas comerciais;
- Especificar custos de mão de obra e ferramental específico, com base em registros históricos da unidade industrial e tabelas de referência;
- Entrevistas informais com engenheiros e técnicos de manutenção da planta, para validação das etapas práticas e identificação de gargalos no processo de substituição.

3.2.2 Mapeamento do processo de substituição do isolamento térmico

O mapeamento do processo de substituição do isolamento térmico constitui uma etapa essencial do estudo. Esse procedimento permitiu estruturar e sistematizar as informações necessárias para compreender, planejar e executar a troca ou a recuperação de materiais isolantes de alta temperatura em equipamentos e tubulações da unidade petroquímica nacional. O mapeamento proporciona uma visão integrada das condições operacionais, dos custos envolvidos e dos critérios técnicos que norteiam a tomada de decisão, sendo os principais critérios para seleção dos equipamentos, de acordo com as normas N-250 (PETROBRAS, 2017) e N-550 (PETROBRAS, 2021):

- Temperatura de processo: ($T \geq 400\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- Identificação do isolante térmico existente;
- Criticidade do equipamento (impacto na operação, segurança, ambiente);
- Condição do isolamento atual (histórico de reparos);
- Saúde & segurança (exposição a fibras, gases, risco de queimaduras);
- Custo estimado de substituição (CAPEX) e vida útil projetada.

O primeiro passo do mapeamento consiste em delimitar o escopo da análise, definindo em quais setores da planta petroquímica a avaliação será realizada e quais equipamentos serão contemplados. Em geral, priorizam-se equipamentos estáticos, como, tubulações, vasos de pressão, caldeiras, trocadores de calor, turbinas e

bombas, devido ao seu papel crítico na operação e ao elevado potencial de perda térmica. Essa definição deve estar alinhada aos objetivos estratégicos da manutenção, de forma a direcionar os recursos para ativos que apresentam maior impacto econômico, energético e de segurança.

Na sequência, procede-se à coleta de informações técnicas e operacionais, a partir de fontes documentais, como desenhos, memoriais descritivos e relatórios de manutenção e de inspeções em campo. Nessas inspeções, são utilizados instrumentos como termografia infravermelha, paquímetros, medidores de espessura e registros fotográficos, que permitem quantificar as condições atuais do isolamento térmico. Dados como diâmetro da tubulação, espessura do material, tipo de proteção contra intempéries, temperatura de processo e extensão da linha são fundamentais para a análise técnica.

Um dos elementos centrais do mapeamento é a construção de um inventário padronizado. Esse inventário organiza os dados coletados em formato de tabela, contemplando variáveis como identificação do ativo, localização, dimensões, material isolante atual, estado de conservação, perdas térmicas estimadas e custos previstos de substituição ou recuperação. A padronização desses registros possibilita comparações diretas entre diferentes ativos e fornece a base para aplicação de métodos de priorização e de análise econômica.

No âmbito da análise econômica, o mapeamento serve de base para aplicação da metodologia ABC. Por meio dessa abordagem, cada atividade relacionada ao processo, como, desmontagem, recuperação, montagem de novo isolante é associada a direcionadores de custos específicos, como metros quadrados de isolamento ou horas de mão de obra. Assim, os custos diretos (materiais e mão de obra) e indiretos (mobilização, supervisão, logística) são corretamente alocados, refletindo a realidade operacional do projeto.

O mapeamento do processo de substituição do isolamento térmico fornece os dados necessários para fundamentar as decisões, orientando a alocação eficiente de recursos, reduzindo incertezas no projeto e garante maior confiabilidade nos sistemas térmicos industriais da petroquímica.

3.2.3 Quantificar e classificar os custos associados à substituição do isolante térmico

Essa etapa teve como foco identificar, quantificar e classificar os custos envolvidos na substituição do isolamento térmico de alta temperatura, segmentando-os em diretos (materiais, mão de obra, equipamentos) e indiretos (mobilização, encargos, supervisão técnica, transporte, entre outros). Essa categorização foi realizada com base nas diretrizes de engenharia de custos e no método ABC, permitindo uma alocação mais precisa dos recursos. Essa abordagem foi escolhida por possibilitar uma alocação mais precisa dos custos, associando cada atividade executada ao consumo efetivo de recursos. O processo será dividido em três etapas principais:

- Identificação das atividades críticas: o processo foi dividido em desmontagem, recuperação, montagem do isolamento e reinstalação da proteção contra intempéries, tratadas como unidades de análise.
- Definição dos direcionadores de custos: definidos como m² de área isolada e horas-homens, permitindo associar recursos diretamente a cada atividade;
- Alocação dos custos diretos e indiretos: diretos incluem materiais, ferramentas e mão de obra; indiretos abrangem encargos, supervisão, mobilização, transporte e logística, garantindo maior transparência e comparabilidade entre cenários.

Além da aplicação do método ABC, que identifica o custo de cada atividade, o trabalho se apoia em diretrizes da engenharia de custos discutidas na revisão teórica, reforçando a importância de integrar o planejamento técnico ao controle econômico do projeto.

A análise também incorpora a avaliação do ciclo de vida dos materiais, como lâ de rocha e aerogel, permitindo prever impactos econômicos em planos plurianuais de manutenção. Paralelamente, são aplicados critérios de sustentabilidade e eficiência energética, alinhados aos ODS 9 e 12, que incentivam o uso racional de energia, a redução de perdas e a gestão responsável de recursos. Dessa forma, a metodologia não se limita à mensuração imediata dos custos, mas amplia a visão para aspectos técnicos, de segurança e de durabilidade, garantindo recomendações consistentes para o curto e o longo prazo.

3.2.4 Catalogar dados reais de aquisição dos isolantes térmicos

Nesta etapa, foram levantados dados de mercado e informações históricas da unidade industrial, de modo a compor uma base confiável para a análise técnica e econômica da substituição do isolamento térmico. O levantamento abrangeu três dimensões principais: materiais isolantes, mão de obra especializada e ferramentas de apoio.

No que se refere aos materiais isolantes, foram pesquisados fornecedores do mercado nacional, com destaque para empresas fabricantes e distribuidoras de lã de rocha e aerogel, ambos amplamente empregados em aplicações de alta temperatura. Os preços coletados correspondem a valores de aquisição por unidade (m^2) praticados por fornecedores especializados. A catalogação incluiu dados de densidade, condutividade térmica, resistência à compressão e limites de temperatura de aplicação, que foram utilizados na análise comparativa.

Quanto à mão de obra especializada, foram considerados os custos horários e diários de profissionais necessários às atividades de desmontagem, recuperação e montagem do isolamento térmico, incluindo isoladores, ajudantes e supervisores técnicos. Esses valores foram coletados a partir de tabelas de honorários e de empresas prestadoras de serviços industriais.

Por fim, em relação às ferramentas e equipamentos auxiliares, foram catalogados os custos de uso de andaimes, ferramentas manuais, equipamentos de proteção individual (EPIs) e veículos de apoio, todos fundamentais para a execução segura e eficiente das atividades.

Dessa forma, a coleta de dados não se restringiu apenas ao preço dos materiais, mas também integrou os principais recursos relacionados ao processo, permitindo que a análise econômica represente com fidelidade a realidade do setor industrial petroquímico e possibilite a aplicação do método ABC de forma consistente.

3.2.5 Relacionar embasamentos técnicos, econômicos e operacionais para tomada de decisão sobre a substituição do isolante

O procedimento e análise dos dados coletados será estruturado para permitir o embasamento técnico do desempenho dos materiais isolantes, e a quantificação

precisa dos custos de forma que o resultado permita a tomada de decisão baseada nas evidências. Será realizado da seguinte forma:

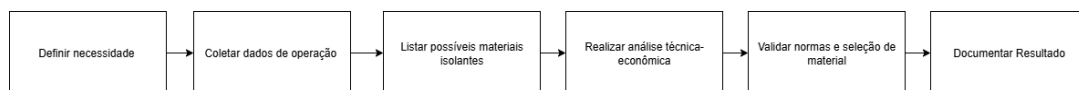
- Avaliação comparativa de desempenho, considerando critérios como durabilidade, segurança, manutenção preventiva e impacto ambiental;
- Aplicação de fatores de segurança nos cálculos, visando reduzir riscos de falha e garantir a confiabilidade operacional;
- Identificação das atividades específicas da substituição do isolamento térmico (desmontagem, recuperação e montagem);
- Distribuição dos custos proporcionalmente às atividades realizadas;
- Uso de planilhas eletrônicas para simular diferentes cenários de aplicação (materiais distintos, variação de espessura, condições operacionais);
- Cálculo do custo total dos cenários.

Após a conclusão desta análise, os resultados serão organizados e documentados a fim de permitir a interpretação rápida e objetiva, apoiando futuras decisões e estratégias através de tabelas comparativas contendo as propriedades técnicas, os custos totais e a vida útil estimada para cada material analisado, tabelas para representar os custos, e a indicação do cenário mais econômico e do cenário mais seguro, destacando vantagens e desvantagens de cada um.

3.2.6 Propor recomendações práticas para gestão de custo

Com base nas análises, foram elaboradas conclusões e recomendações voltadas à tomada de decisão estratégica no setor petroquímico, considerando não apenas o custo inicial, mas também os benefícios operacionais e de sustentabilidade no médio e longo prazo. A Figura 5 apresenta o fluxograma recomendado para o processo de seleção de material isolante e apresenta as etapas necessárias para a escolha técnica e econômica mais adequada às condições de operação dos sistemas térmicos industriais.

Figura 5 - Fluxograma do processo de análise técnica-econômica da substituição do isolamento térmico de alta temperatura



Fonte: Autoria própria (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresentará uma análise detalhada da substituição do isolamento térmico de alta temperatura, os resultados obtidos e os benefícios alcançados, demonstrando a eficácia das soluções adotadas no contexto da indústria petroquímica.

4.1 DADOS DO ESTUDO DE CASO

O estudo considerou como base um sistema industrial exposto a temperaturas de até 600 °C, abrangendo tubulações, válvulas, tanques, vasos de pressão e trocadores de calor. Foram avaliados os materiais lã de rocha e aerogel, ambos com ampla aplicação na indústria petroquímica. As atividades foram executadas ao longo de 48 meses, em uma indústria petroquímica, essas intervenções foram em três tipos principais de atividades:

- Desmontagem de isolamento térmico: Consiste na desmontagem do isolamento térmico existente, incluindo elementos de fixação (não soldados), chapas de proteção contra intempéries e todas as camadas do isolante térmico. A remoção do isolamento térmico será efetuada através da desmontagem dos acessórios evitando danos ao material isolante em tubulações e equipamentos;
- Montagem de isolamento térmico: Compreende a montagem de novas calhas, segmentos ou placas de isolantes térmicos com diversas espessuras em tubulações e equipamentos;
- Recuperação e montagem de proteção contra intempéries: Recuperação e montagem de proteção contra intempéries, aplicando chapa de alumínio liso, e todos os acessórios necessários.

As unidades de medição dos insumos foram definidas em metros quadrados para os serviços de substituição de isolamento, e a quantidades histórica de substituição para a unidade industrial, ao longo do período de estudo, foi de 1723 m².

A hipótese inicial que a lã de rocha permanece como opção de menor custo, sendo viável em projetos com restrição orçamentária imediata. Contudo, sua durabilidade limitada e a necessidade de substituições mais frequentes elevariam o custo global do ciclo de vida. Por outro lado, o aerogel, embora mais oneroso na aquisição, apresenta maior desempenho térmico, vida útil superior e melhor retorno econômico a médio e longo prazo, além de ganhos relevantes em eficiência energética e sustentabilidade, detalhados no quadro 2.

Quadro 2 - Comparativo entre os isolantes térmicos estudados

Critério	Lã de rocha	Aerogel
Técnico	<p>Maior condutividade térmica;</p> <p>Maior densidade;</p> <p>Maior absorção de umidade;</p> <p>Menor vida útil.</p>	<p>Menor condutividade térmica;</p> <p>Menor densidade;</p> <p>Menor absorção de umidade;</p> <p>Maior vida útil.</p>
Econômico	<p>Menor custo;</p> <p>Maior substituição.</p>	<p>Maior custo;</p> <p>Menor substituição.</p>
Segurança e saúde	<p>Maior liberação de fibras;</p> <p>Exige EPIs rigorosos.</p>	<p>Menor liberação de fibras;</p> <p>Não exige EPIs rigorosos.</p>
Sustentabilidade	<p>Maior pegada de carbono na produção;</p> <p>Menor eficiência energética.</p>	<p>Menor emissão de carbono na produção;</p> <p>Maior eficiência energética.</p>

Fonte: Autoria própria (2025)

A mão de obra e equipe técnica necessária para a realização das atividades, com base no histórico da unidade industrial, está descrita no quadro 3 que representa a carga horária total de mão de obra que devem ser programadas semanalmente ao longo do prazo de execução, considerando uma jornada semanal de 40 horas, e da categoria profissional necessária:

Quadro 3 - Mão de obra necessária do estudo de caso

Profissional	Quantidade	Nível profissional
Isolador	9	Técnico de nível B
Funileiro	4	Técnico de nível B
Encarregado	1	Trainee
Técnico de segurança do trabalho	1	Técnico de nível A
Engenheiro mecânico	1	Pleno

Fonte :Autoria própria (2025)

As atividades apresentadas exigem o uso de ferramentas específicas, que devem garantir precisão, segurança e produtividade na execução. A seguir, apresenta-se a relação das principais ferramentas e que serão utilizadas no tipo de serviço:

- Alicate universal;
- Alicate de corte;
- Tesoura manual para chapas;
- Trena metálica;
- Estilete industrial;
- Furadeira elétrica com brocas;
- Rebitadeira;
- Parafusadeira com bits diversos;
- Martelo de borracha;
- Arco de serra;
- Escova de aço manual;
- Lixadeira angular;
- Conjunto de EPI's (luvas, óculos, capacete, protetor auricular, respirador);
- Soprador térmico;
- Serra tico-tico com lâminas;
- Notebook e softwares licenciados.

Além dos recursos diretamente vinculados à execução dos serviços como, materiais isolantes mão de obra e ferramentas, a substituição do isolamento térmico demanda uma estrutura de apoio composta por diversos recursos indiretos. Esses elementos são fundamentais para viabilizar a operação, garantir segurança, logística

eficiente e controle técnico, mesmo não sendo aplicados diretamente na interface do serviço.

A seguir, apresentam-se os principais recursos indiretos considerados neste estudo:

- Oficina de apoio;
- Almoxarifado;
- Refeitórios;
- Vestiários e banheiros;
- Área de vivência.

Esses recursos foram disponibilizados pela própria unidade petroquímica, não compondo diretamente as atividades de instalação, mas foram previstos os custos de conservação e limpeza, uma vez que impactam diretamente a produtividade e conformidade legal da execução da obra.

4.2 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E NORMATIVO

O levantamento bibliográfico teve como objetivo consolidar a base teórica necessária para embasar a análise técnica e econômica da substituição do isolamento térmico de alta temperatura em sistemas industriais. A pesquisa contemplou livros, artigos científicos, normas técnicas e manuais de fabricantes, com foco nos temas de engenharia de custos, materiais isolantes térmicos, gestão de manutenção industrial e eficiência energética.

Entre as principais referências consultadas, destacam-se Incropera (2008), e Çengel (2009), que fundamentam os princípios de transferência de calor e propriedades térmicas dos materiais; Dias (2003) e Vanzella e Lunkes (2006), que abordam os conceitos de custos diretos e indiretos e sua aplicação na engenharia de custos; e Milcent (2007), que relaciona a correta especificação e manutenção do isolamento térmico ao desempenho operacional e à economia de processos industriais.

Além disso, foram analisadas normas técnicas como a NBR 11626 (ABNT 2015) (materiais isolantes térmicos para altas temperaturas), bem como manuais de fabricantes de lã de rocha e aerogel, utilizados para comparar propriedades físicas,

resistência mecânica e condutividade térmica. Essa revisão permitiu estruturar critérios de seleção técnica, indicadores de desempenho e parâmetros econômicos, servindo de suporte para as etapas práticas do estudo de caso e para a formulação da metodologia baseada no método ABC.

Em conjunto, esse levantamento bibliográfico forneceu o arcabouço conceitual que orientou as análises desenvolvidas, garantindo rigor técnico e alinhamento com as práticas atuais de sustentabilidade, segurança e eficiência energética aplicadas na indústria petroquímica.

4.3 MAPEAMENTO DO PROCESSO DE SUBSTITUIÇÃO

O mapeamento do processo de substituição do isolamento térmico foi desenvolvido com o objetivo de compreender e sistematizar as etapas envolvidas na manutenção de sistemas térmicos industriais, assegurando uma análise integrada entre os aspectos técnicos, operacionais e econômicos. Essa etapa permitiu identificar as atividades críticas, os recursos necessários e os pontos de decisão que influenciam diretamente o custo, a segurança e a eficiência energética da intervenção.

Inicialmente, o foi delimitado o escopo do processo, abrangendo equipamentos e sistemas típicos de uma planta petroquímica, tais como tubulações, válvulas, tanques, vasos de pressão e trocadores de calor, sujeitos a temperaturas de operação de até 600 °C. A partir dessa definição, as etapas do processo foram organizadas em uma sequência lógica, contemplando:

- A identificação da necessidade de substituição ou recuperação do isolamento;
- A coleta de dados operacionais (tipo do ativo, faixa de temperatura, tempo da última manutenção e condição atual do isolamento);
- A listagem dos materiais isolantes possíveis (lã de rocha ou aerogel);
- A análise dos critérios técnicos e econômicos;
- A validação de normas aplicáveis;
- A seleção do material mais adequado;
- O registro e documentação da decisão técnica.

O mapeamento foi representado por meio de um fluxograma do processo, representado na Figura 5, que sintetiza as etapas decisórias e operacionais desde o diagnóstico inicial até a conclusão do serviço. Essa estrutura visual facilitou a integração entre as áreas de engenharia, manutenção e suprimentos, além de padronizar a sequência de atividades e reduzir o risco de falhas de comunicação entre os setores.

Durante o processo, foram aplicados critérios técnicos, como condutividade térmica, resistência mecânica e comportamento frente à umidade, e critérios econômicos, como custo de aquisição, instalação e ciclo de vida útil. A abordagem adotada seguiu as diretrizes da petroquímica, permitindo que o mapeamento servisse não apenas como uma ferramenta operacional, mas também como um instrumento estratégico para subsidiar decisões de investimento em manutenção térmica.

4.4 QUANTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS CUSTOS

A etapa de quantificação e classificação dos custos teve como objetivo identificar, mensurar e organizar os elementos financeiros envolvidos no processo de substituição do isolamento térmico de alta temperatura, de modo a possibilitar uma análise precisa do impacto econômico de cada atividade. Essa etapa foi estruturada de acordo com os princípios da Engenharia de Custos e com base no método de custeio ABC, que permite alocar os custos de maneira mais realista, conforme o consumo de recursos por atividade.

Inicialmente, os custos foram quantificados a partir de planilhas de levantamento físico, considerando as dimensões reais das superfícies a serem isoladas das tubulações, tanques, vasos de pressão e trocadores de calor. As atividades envolvidas foram classificadas em desmontagem do isolamento existente, recuperação parcial de isolantes e montagem de novo isolamento térmico, abrangendo também a reinstalação da proteção contra intempéries. Para cada atividade, foram definidas unidades de medição (m^2), produtividade média de mão de obra, tempo de execução e custos unitários correspondentes.

Em seguida, procedeu-se à classificação dos custos, que foram agrupados em diretos e indiretos. Os custos diretos compreendem a aquisição dos materiais isolantes (lã de rocha ou aerogel), ferramentas específicas, materiais auxiliares e mão de obra técnica especializada. Já os custos indiretos incluem encargos trabalhistas,

mobilização de equipes, supervisão técnica, transporte, logística e conservação das áreas de apoio disponibilizadas pela planta petroquímica, como oficina, almoxarifado, refeitório e vestiário. Essa separação é essencial para garantir transparência na composição do orçamento e maior controle dos gastos ao longo do ciclo de vida do projeto.

Para a análise comparativa entre cenários, foram simuladas duas condições distintas:

- Cenário 1 (Conservador): substituição total de 90% do volume do isolamento térmico e recuperação de 10%.
- Cenário 2 (flexível): substituição total de 70% e recuperação de 30%.

Esses cenários permitiram avaliar como pequenas variações nas estratégias de substituição podem afetar o custo total e o retorno sobre o investimento, contribuindo para decisões mais precisas na gestão da manutenção térmica industrial.

4.5 ANÁLISE TÉCNICA

A análise técnica considerou propriedades como condutividade térmica, faixa de temperatura operacional, comportamento frente a umidade, resistência mecânica e vida útil estimada. Foram avaliados lã de rocha e aerogel, ambos com reconhecida aplicação industrial, porém com características distintas, a lã de rocha apresenta custo inicial mais baixo e boa resistência mecânica, enquanto o aerogel, apesar de mais caro, oferece desempenho térmico superior e menor espessura de aplicação. Esses materiais e respectivas características encontram-se resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Isolantes térmicos estudados e respectivas características

Isolante	Densidade (kg·m³)	Condutividade térmica (W/(m·K))	Resistência a compressão a 10% de deformação (σ_{10}) (kPa)
Lã de rocha	110	0,036	45
Aerogel	26	0,012	29

Fonte: Autoria própria (2025)

A comparação direta entre as propriedades técnicas dos materiais evidencia vantagens significativas do aerogel frente à lã de rocha no quesito desempenho térmico. A condutividade térmica do aerogel é cerca de três vezes inferior à da lã de rocha, o que resulta em maior eficiência no isolamento e menor perda de calor. Além disso, sua densidade é consideravelmente menor, contribuindo para a redução de peso estrutural em aplicações industriais. Embora a resistência à compressão do aerogel seja inferior à da lã de rocha, este fator é compensado pelo seu desempenho térmico superior e menor volume necessário para atingir o mesmo nível de isolamento. Assim, sob a ótica técnica, o aerogel apresenta-se como a solução mais eficiente para aplicações que demandam alta performance térmica e otimização estrutural.

O comportamento frente à umidade também é um parâmetro fundamental na análise técnica do desempenho e da durabilidade dos materiais isolantes. A lã de rocha, composta por fibras minerais obtidas do basalto, apresenta uma absorção de umidade típica entre 1% e 2% em massa quando exposta à água ou à condensação sem barreira de vapor eficiente NBR 11626 (ABNT 2015). Essa absorção aumenta a condutividade térmica em até 15%, reduzindo o desempenho energético. Em contrapartida, o aerogel de sílica, devido à sua estrutura nanoporosa e propriedades hidrofóbicas, apresenta absorção inferior a 0,2% em massa, mantendo sua condutividade térmica praticamente constante, mesmo após exposição prolongada à umidade. Essa estabilidade confere ao aerogel uma vantagem significativa em ambientes industriais úmidos ou sujeitos à condensação, reduzindo a frequência de intervenções de manutenção e prolongando o ciclo de vida útil do isolamento. Assim, enquanto a lã de rocha demanda proteção mecânica e barreira de vapor adequadas para preservar seu desempenho, o aerogel demonstra superioridade técnica em durabilidade, confiabilidade e eficiência térmica em condições adversas.

Além desses critérios também é necessário avaliar o tempo de vida útil esperado para cada isolante, visto que a vida de referência fornecida pelo fabricante é indicada para casos específicos simulados em laboratórios, é preciso considerar fatores como a quantidade de ciclos térmicos por semana, perdas de espessura, temperatura de operação divergindo, ambiente corrosivo ou intensificadores de calor, como por exemplo, a exposição a raios UV. Mesmo que os fornecedores indiquem um determinado prazo de vida útil, é necessário adotar uma substituição preventiva entre

70% e 50% desse período para garantir a segurança, reduzir riscos e falhas, melhorar a eficiência térmica e evitar paradas emergenciais, conforme a

Tabela 2 - Vida útil estimada dos Isolantes térmicos estudados

Isolante	Ambiente	Fator perda de espessura	Fator intensificador temp.	Fator degradação pelo ambiente	Fator de segurança	Vida útil inicial (anos)	Vida útil estimada (anos)
Lã de rocha	Interno	1,05	1,12	1,20	1,5	4,00	1,85
Aerogel	Interno	1,05	1,12	1,20	1,5	7,00	3,79
Lã de rocha	externo	1,07	1,25	1,34	1,5	4,00	1,49
Aerogel	externo	1,07	1,25	1,34	1,5	7,00	3,72

Fonte :Autoria própria (2025)

A vida útil foi estimada a em dois cenários, para os ambientes internos e externos a petroquímica, a partir da vida útil fornecida pelo fabricante e os fatores que geram um aumento na degradação do isolante, obtidos através de dados históricos de inspeções da petroquímica.

A análise da vida útil dos materiais isolantes revelou que para ambientes internos a lã de rocha apresenta uma previsão de substituição a cada 1,85 ano, enquanto o aerogel possui um intervalo estimado de 3,79 anos. Essa diferença representa um fator relevante na definição de um plano de manutenção, pois influencia diretamente o ciclo de intervenções, a programação de paradas e o esforço total de substituições do sistema térmico. Para os ambientes externos, que são mais expostos, a diferença é ainda maior a lã de rocha apresenta uma previsão de substituição a cada 1,49 ano, enquanto o aerogel possui um intervalo estimado de 3,72 anos.

A análise da geometria de aplicação nos ativos e equipamentos também evidenciou desafios técnicos relevantes. Nas tubulações, destacam-se as dificuldades em garantir a uniformidade da espessura do isolante, sobretudo em curvas e conexões, além da necessidade de considerar a dilatação térmica. Nas válvulas, o isolamento deve ser removível para permitir inspeções frequentes, o que aumenta

custos, reduz a eficiência da vedação térmica e pode favorecer a corrosão sob o isolante. Já os tanques apresentam grandes áreas superficiais, elevando significativamente os custos, além de desafios de estanqueidade e riscos de estratificação térmica nos fluidos armazenados. Por fim, os vasos de pressão demandam maior rigor normativo, pois falhas no isolamento podem elevar a temperatura externa, comprometendo a segurança operacional e a integridade estrutural, sobretudo em regiões críticas como bocais e flanges. A metodologia de aplicação dos isolantes considerou as particularidades geométricas, operacionais e de acessibilidade de cada ativo, de acordo com a norma N-250 (PETROBRAS, 2017) detalhados nos anexos A, B, C, D e E.

A avaliação de segurança destacou que a lã de rocha pode liberar fibras respiráveis, exigindo o uso de EPIs adequados durante a instalação e manutenção. Já o aerogel, embora também exija cuidados, possui menor liberação de fibras e não apresenta toxicidade significativa em condições normais de uso. Ambos os materiais são não inflamáveis, atendendo aos requisitos de segurança contra incêndios.

No aspecto ambiental, a lã de rocha é parcialmente reciclável, mas seu processo de fabricação apresenta maior pegada de carbono. O aerogel, por sua vez, tem produção mais complexa, porém reduz de forma significativa o consumo de energia ao longo da operação, contribuindo para a diminuição das emissões indiretas de CO₂. Ambas as soluções estão alinhadas aos ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), mas o aerogel se destaca pela eficiência energética a longo prazo.

4.6 ANÁLISE ECONÔMICA

Para a análise econômica da substituição do isolamento térmico de alta temperatura foi estudado aquisição dos isolantes, fixadores e chapas de proteção contra intempéries, custos com a mão de obra, ferramentas e recursos indiretos necessários. Nessa primeira etapa, foram identificados e mensurados os custos diretos associados à compra dos materiais isolantes, no caso, lã de rocha e aerogel, além dos insumos complementares necessários para sua aplicação, como arames, fitas de vedação, revestimentos metálicos e elementos de fixação. Os valores apresentados nas Tabela 3 e Tabela 4 contemplam a aquisição, transporte e armazenamento, considerando três fornecedores nacionais.

Tabela 3 - Custo unitário de aquisição dos isolantes térmicos estudados

Isolante	Espessura (mm)	Fornecedor 1 (R\$/m²)	Fornecedor 2 (R\$/m²)	Fornecedor 3 (R\$/m²)
Lã de rocha	20 mm	279,90	353,60	489,90
Aerogel	20 mm	877,56	810,00	852,81

Fonte :Autoria própria (2025)

Também foi observado o impacto da especificação técnica sobre o preço, uma vez que o material com maior desempenho térmico, o aerogel, apresenta custo de aquisição mais elevado, contudo tem maior potencial para gerar economia operacional ao longo do tempo.

Tabela 4 - Custo total de aquisição dos isolantes térmicos

Isolante	Quantidade total (m²)	Custo total fornecedor 1	Custo total fornecedor 2	Custo total fornecedor 3
Lã de rocha	1723	R\$ 482.267,70	R\$ 609.252,80	R\$ 844.097,70
Aerogel	1723	R\$ 1.512.035,88	R\$ 1.395.630,00	R\$ 1.469.391,63

Fonte: Autoria própria (2025)

Os custos de mão de obra foram calculados de acordo com a metodologia ABC, com base na quantidade de horas-homens necessárias para substituir uma unidade de metro quadrado de isolamento térmico, levando em conta os índices de produtividade para desmontagem, montagem e recuperação, e a tabela de honorários do IBEC conforme as Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 5 - Esforço necessário por atividade

Atividade	Lã de rocha (Total H/h)	Aerogel (Total H/h)
Desmontagem	7495	4600
Montagem	18281	11802
Recuperação	14628	9442

Fonte :Autoria própria (2025)

Os custos de mão de obra são elaborados de acordo com as obrigações financeiras, que vão além do salário bruto do trabalhador, destinadas a garantir direitos e benefícios previdenciários, trabalhistas e sociais para o funcionário. Incluem

contribuições como INSS (Previdência Social), FGTS (Fundo de Garantia), repouso semanal remunerado, 13º salário, férias, aviso prévio, exames médicos ocupacionais, alimentação, transporte, bônus e premiações. Esses custos são obrigatórios e devem ser considerados no planejamento orçamentário das empresas para assegurar o bem-estar dos colaboradores e cumprir a legislação.

Tabela 6 - Custo por hora da mão de obra

Profissional	Custo por hora	Categoria profissional
Isolador	R\$ 70,28	Técnico de nível B
Funileiro	R\$ 70,28	Técnico de nível B
Encarregado	R\$ 103,11	Trainee
Técnico de segurança do trabalho	R\$ 85,58	Técnico de nível A
Engenheiro mecânico	R\$ 181,68	Pleno

Fonte: Tabela de honorários profissionais e critérios para cálculo de BDI. (2019 p 14)

A composição da equipe de trabalho varia conforme a natureza de cada atividade envolvida no processo de substituição do isolamento térmico. Nas etapas de desmontagem, recuperação e montagem, a alocação de profissionais é definida de acordo com as exigências técnicas específicas de cada fase. Dessa forma, a quantidade e o perfil da mão de obra empregada são ajustados para atender às demandas operacionais. A Tabela 7 apresenta a distribuição dos profissionais por atividade, evidenciando a adequação da equipe ao grau de complexidade e à especialização requerida em cada etapa do serviço.

Tabela 7 - Composição das equipes por atividade

Profissional	Composição da equipe (Desmontagem)	Composição da equipe (Montagem)	Composição da equipe (Recuperação)
Isolador	40%	40%	30%
Funileiro	30%	40%	40%
Encarregado	15%	7%	10%
Técnico de segurança do trabalho	15%	7%	10%
Engenheiro mecânico	0%	6%	10%

TOTAL	100%	100%	100%
--------------	-------------	-------------	-------------

Fonte: Autoria própria (2025)

As ferramentas básicas são essenciais para a execução das atividades de desmontagem, recuperação e montagem de isolamento térmico industrial. Cada grupo de ferramentas atende a uma etapa específica do processo, garantindo segurança, precisão e produtividade. Os alicates, tesouras e estiletes são utilizados no corte e ajuste de mantas isolantes (lã de rocha e aerogel), bem como no manuseio de fitas, fios e acabamentos. A trena metálica e o notebook com softwares de cálculo são fundamentais para o levantamento dimensional e controle técnico da aplicação, assegurando conformidade com os desenhos e especificações de projeto. Já as ferramentas compartilhadas, como furadeiras, lixadeiras, sopradores térmicos e parafusadeiras, são empregadas na fixação de chapas metálicas e na preparação das superfícies para montagem das proteções contra intempéries. Os EPIs, como luvas, óculos, protetores auriculares, capacete e respirador são indispensáveis para a integridade física dos trabalhadores, conforme as normas NR-6 e NR-18. Por sua natureza consumível e desgaste acelerado, devem ser substituídos periodicamente.

Os custos de manutenção, conservação e limpeza da oficina de apoio, almoxarifado, refeitórios, vestiários, banheiros e área de vivência foram representados sem depreciação. Para completar a análise econômica, foram simulados dois cenários distintos de intervenção apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Custo dos recursos diretos e indiretos

Descrição	Custo unitário de aquisição (R\$)	Depreciação 60% (R\$)	Custo unitário mensal (R\$)	Qtd. de meses	Qtd. de itens	Custo total
Ferramentas básicas	R\$ 2.005	R\$ 1.203	R\$ 25,06	48	13	R\$ 15.639
EPIs	R\$ 600	R\$ 360	R\$ 7,50	48	16	R\$ 5.760
Equipamentos compartilhados	R\$ 680	R\$ 408	R\$ 102,00	48	4	R\$ 19.584
Notebooks e softwares licenciados	R\$ 5.000	R\$ 3.000	R\$ 62,50	48	3	R\$ 9.000
Manutenção, conservação e limpeza	R\$ -	R\$ -	R\$ 750,00	48	5	R\$ 180.000
TOTAL	R\$ 8.285	R\$ 4.971	R\$ 947	48	41	R\$ 229.983

Fonte: Autoria própria (2025)

No cenário conservador, considerou-se a substituição integral de 90% do volume total de isolamento térmico existente, contemplando todas as atividades de desmontagem do material degradado e a posterior montagem de novo isolante. Os 10% restantes foram destinados à recuperação do isolamento atual, envolvendo reparos pontuais e reaproveitamento parcial dos materiais, desde que atendidas as condições mínimas de desempenho e segurança previstas em norma. Os custos concentram-se principalmente na montagem da lã de rocha R\$ 1.278.187,49 e na montagem do aerogel R\$ 825.220,01, totalizando valores mais representativos em função da maior proporção de substituição integral, totalizando R\$ 1.903.687,96 para lã de rocha e R\$ 1.210.080,27 para o aerogel, apresentados na Tabela 9 e Tabela 10.

No segundo cenário, de caráter mais flexível, foi adotada a proporção de 70% de substituição total e 30% de recuperação. Essa alternativa buscou representar uma estratégia de manutenção equilibrada, em que a recuperação é utilizada de forma mais ampla como forma de reduzir custos imediatos e, ao mesmo tempo, prolongar a vida útil de parte dos materiais já instalados, totalizando R\$ 1.736.020,23 para lã de

rocha e R\$ 1.099.992,35 para o aerogel, observa-se uma redução proporcional nos custos de desmontagem e montagem, tanto para a lã de rocha quanto para o aerogel. Nesse cenário, há um aumento relevante nos valores de recuperação, detalhado na Tabela **Erro! Fonte de referência não encontrada.**9 e Tabela 11.

Tabela 9 – Custo unitário por atividade

Atividade	Unidade	Custo unitário Lã de rocha	Custo unitário Aerogel
Desmontagem	m²	R\$ 329,26	R\$ 202,10
Montagem	m²	R\$ 824,26	R\$ 532,16
Recuperação	m²	R\$ 666,97	R\$ 414,79
TOTAL	m²	R\$ 1.104,87	R\$ 702,31

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 10 - Custo total por atividade no cenário conservador

Atividade	Quantidade	Unidade	Custo total Lã de rocha	Custo total Aerogel
Desmontagem	1550,70	m²	R\$ 510.582,15	R\$ 313.391,80
Montagem	1550,70	m²	R\$ 1.278.187,49	R\$ 825.220,01
Recuperação	172,30	m²	R\$ 114.918,32	R\$ 71.468,46
TOTAL	1723,00	m²	R\$1.903.687,96	R\$1.210.080,27

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 11 - Custo total no cenário flexível

Atividade	Quantidade	Unidade	Custo total Lã de rocha	Custo total Aerogel
Desmontagem	1206,10	m²	R\$ 397.119,45	R\$ 243.749,18
Montagem	1206,10	m²	R\$ 994.145,82	R\$ 641.837,79
Recuperação	516,90	m²	R\$ 344.754,96	R\$ 214.405,38
TOTAL	1723,00	m²	R\$1.736.020,23	R\$1.099.992,35

Fonte: Autoria própria (2025)

A comparação entre os cenários permitiu avaliar não apenas os custos associados a cada estratégia, mas também os impactos operacionais, conseguindo reduzir até 10,79% para a lã de rocha, e 14,62% para o aerogel, de acordo com a Tabela 12 e a Tabela 13. Essa abordagem contribui para fundamentar decisões que conciliem desempenho técnico e racionalidade econômica, oferecendo suporte à gestão estratégica da manutenção industrial.

Tabela 122 - Custo total do cenário conservador

Descrição	Cenário conservador Lã de rocha	Cenário conservador Aerogel
Ferramentas básicas	R\$ 15.639	R\$ 15.639
EPIs	R\$ 5.760	R\$ 5.760
Equipamentos compartilhados	R\$ 19.584	R\$ 19.584
Notebooks e softwares licenciados	R\$ 9.000	R\$ 9.000
Manutenção, conservação e limpeza	R\$ 180.000	R\$ 180.000
Mão de obra	R\$ 1.903.688	R\$ 1.210.080
Material isolante	R\$ 548.328	R\$ 1.322.452
TOTAL	R\$ 2.681.999	R\$ 2.762.515

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 13 - Custo total do cenário flexível

Descrição	Cenário flexível Lã de rocha	Cenário flexível Aerogel
Ferramentas básicas	R\$ 15.639	R\$ 15.639
EPIs	R\$ 5.760	R\$ 5.760
Equipamentos compartilhados	R\$ 19.584	R\$ 19.584
Notebooks e softwares licenciados	R\$ 9.000	R\$ 9.000
Manutenção, conservação e limpeza	R\$ 180.000	R\$ 180.000
Mão de obra	R\$ 1.736.020	R\$ 1.099.992
Material isolante	R\$ 426.477	R\$ 1.028.574
TOTAL	R\$ 2.392.480	R\$ 2.358.549

Fonte: Autoria própria (2025)

Ao aplicar o método de custeio ABC para avaliar o impacto financeiro da substituição do isolamento, verificou-se que o aerogel, apresenta maior custo de

aquisição em comparação à lã de rocha, contudo este acréscimo não decorre na atividade de substituição, devido ao seu manuseio e instalação. Dessa forma, a análise econômica indica que a adoção do aerogel implica maior investimento inicial, o que exige uma avaliação criteriosa do retorno sobre o investimento considerando a economia de energia e a durabilidade ampliada proporcionadas pelo material ao longo do ciclo de vida do sistema.

5 CONCLUSÕES GERAIS

A presente pesquisa pretende gerar contribuições técnicas e gerenciais relevantes para o planejamento, execução e controle da manutenção industrial em sistemas térmicos de alta temperatura no setor petroquímico. Entre os principais resultados esperados, destacam-se o aperfeiçoamento do processo de seleção de materiais isolantes de alta temperatura, fornecendo embasamento técnico para a escolha entre lã de rocha e aerogel com base em desempenho térmico, vida útil, resistência mecânica e custos de substituição. Otimização da manutenção industrial de sistemas térmicos, com base na análise comparativa da vida útil dos materiais, possibilitando programar intervenções de forma estratégica para reduzir paradas não planejadas e prolongar a eficiência operacional dos equipamentos. Contribuição para a sustentabilidade industrial, consolidando dados técnicos, econômicos e operacionais para propor soluções que reduzirão os desperdícios de energia e recursos, alinhando-se aos objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 9 e ODS 12) da ONU.

5.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho contribui para o avanço da compreensão técnica e econômica da substituição de isolamento térmico de alta temperatura na indústria petroquímica, ao integrar parâmetros de desempenho dos materiais com a análise econômica. A aplicação do método ABC para avaliação econômica permitiu maior transparência na identificação dos principais direcionadores de custo, destacando os impactos da escolha entre materiais como lã de rocha e aerogel. Além disso, os cenários simulados fornecem subsídios práticos para gestores e engenheiros no processo de tomada de decisão, auxiliando na definição de estratégias de manutenção mais eficientes e sustentáveis, alinhadas às diretrizes de otimização de recursos e eficiência energética

5.2 LIMITAÇÕES E FUTUROS TRABALHOS

Apesar das contribuições, este estudo apresenta limitações relacionadas ao recorte metodológico e à disponibilidade de dados reais de desempenho em campo. A análise concentrou-se em um caso específico de substituição, o que restringe a generalização para outros contextos industriais. Além disso, o cálculo do ciclo de vida útil dos isolantes foi baseado em dados de fornecedores e referências técnicas, podendo divergir das condições reais de operação, sujeitas a variações ambientais e de manutenção. Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação da pesquisa com estudos comparativos em diferentes setores industriais, a aplicação de métodos de monitoramento em tempo real da eficiência do isolamento térmico, e a inclusão de análises ambientais, considerando indicadores de sustentabilidade como pegada de carbono e impacto no ciclo de vida completo dos materiais.

REFERÊNCIAS

- DIAS, PAULO ROBERTO VILELA. **Engenharia de Custos: Novo Conceito de BDI**. 5a ed. Rio de Janeiro: Sindicato dos Editores de Livros, 2003.
- MAASSEN, Karine. **Acompanhamento do custo padrão como apoio à tomada de decisão: o caso de uma indústria petroquímica**. 2010. 138 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- LIMA, Elanice Delgado. **Isolamento Térmico em indústria de Processo Químico**. Dissertação de Mestrado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal) 2018.
- MARTINS, Edmilson da Silva. **Engenharia de custos: fundamentos e aplicações**. São Paulo: PINI, 2010. 325 p.
- CENGEL, Y. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda., 2009. 1008 p.
- INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 648 p.
- DA SILVA, Cristiano Belarmino; VALENÇA, Paulo Henrique Leite; LEITÃO, Carla Renata Silva. **Orçamento Empresarial e suas Características em uma Indústria de Material de Limpeza**. ABCustos, v. 19, n. 1, p. 124, 2024.
- DE ABREU, Karla Gabriela Rosa. **ANÁLISE COMPARATIVA DAS OBRAS: ANÁLISE GERENCIAL DE CUSTOS; CUSTOS CONTABILIDADE DESCOMPLICADA; CONTABILIDADE GERENCIAL BÁSICA**. 2024.
- AL MASHKOOR, Imad AS. The impact of green activity-based costing and green supply chain practices on environmental performance oil refineries in Iraq. **International Journal of Economics and Finance Studies**, v. 14, n. 4, p. 96-113, 2022.
- SOUZA, Laura Dummer de. **Análise do isolamento térmico em revestimentos de fachadas**. 2024.
- DONÁ, Bruno Colombi. **Análise termo-econômica de materiais para aumento de eficiência do isolamento térmico**. 2018.
- SILVA, Otavino Alves. A TECNOLOGIA ENGENHARIA DE CUSTOS PROCEDURAL PARA EMPRESAS DE MANUFATURA. **Ciências Gerenciais em Foco**, v. 9, n. 6, 2018.
- SÁ, H. I. O. **Determinação da condutividade e difusividade térmica de materiais por análise de DSC**. Tese (Mestrado em Técnicas de Caracterização e Análise

Química) – Universidade do Minho Escola de Ciências, Campus de Gualtar. Braga, p. 81. 2017.

CAMARGO, Thiago Luiz Brito. Análise comparativa entre materiais de isolamento térmico a frio para tubulações em unidades de armazenamento e transporte marítimo de GNL. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) -Instituto Politécnico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2023.**

GIL, ANTONIO CARLOS ET AL. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São paulo: atlas, 2002.

MORGADO, J. C. **O estudo de caso na investigação em educação.** 2012.

TEIS, M. A.; TEIS, D. T. **A abordagem qualitativa: a leitura no campo de pesquisa.** Biblioteca online de ciências da comunicação, V. 1, P. 1-8, 2006.

JUNIOR, Claudio Antunes; MONTEGUTTI, Marilise Cristine; HAUS, Tiago Luis. **Análise comparativa da eficiência de isolantes térmicos.** Caderno PAIC, v. 17, n. 1, p. 211-235, 2016.

FERNANDES, Celina Nogueira. **Aerogéis e Cortiça A Combinação Perfeita Para um Isolamento Leve e de Alto Desempenho.** 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal).

BASTOS, Valéria Delgado. **Desafios da petroquímica brasileira no cenário global.** 2009.

BILAS, Richard A. **Teoria Macroeconômica:** uma análise gráfica. 5. ed. Rio de Janeiro: Forense-Universitári, 1976. 168 p.

MILLER, Roger Leroy. **Microeconomia:** teoria, questão e aplicações. São Paulo: McGraw-Hitl do Brasil, 1981. 188 p.

RAMOS, Figueireido. **Isolamento térmico na Indústria.** 1993. Disponível em < [https://bdigital.ipg.pt/dspace/bitstream/10314/812/1/revista%20Nº11%20-%20Ramos%20\(1993\).pdf](https://bdigital.ipg.pt/dspace/bitstream/10314/812/1/revista%20Nº11%20-%20Ramos%20(1993).pdf). > acesso em 10/06/25.

VANZELLA, C; LUNKES, R. J. **Orçamento baseado em atividades:** um estudo de caso em empresa distribuidora de energia elétrica. Contabilidade Vista & Revista, V 17, N. 1, 2006. 132 p.

STRUCKAS FILHO, Carlos Simão. Mensuração dos Custos da Administração Local de Obras segundo o ABC/M: Estudo de Caso da Reforma de uma Unidade Básica de Saúde. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Custos-ABC.** 2024.

MILCENT, Paul Fernand. **Noções de isolamento térmico de tubulações** Paraná: UFPR, 2007. Trabalho acadêmico. Disponível em <https://www.academia.edu/download/49862953/apost_iso_tub_22007.pdf. > acesso em 10/06/25 /.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7556 Alumínio e suas ligas e chapas**. Rio de Janeiro: 2006. Disponível em < <https://www.normas.com.br/visualizar/projeto-nbr/50249/projeto-de-revisao-abnt-nbr-7556-aluminio-e-suas-ligas-chapas-e-laminas-requisitos>> acesso em 11/07/25

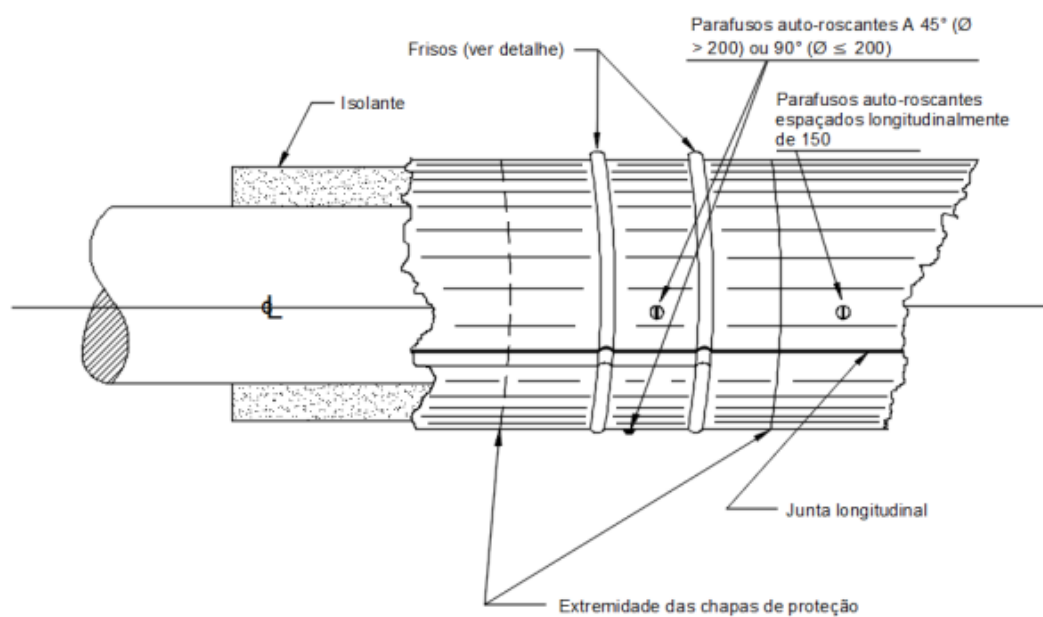
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11626 Isolantes térmicos de lã de rocha**. Rio de Janeiro: 2015. Disponível em < <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/543/abnt-nbr11626-isolantes-termicos-de-la-de-rocha-flocos>> acesso em 10/07/25

PETROBRAS. **N-250: Montagem de isolamento térmico**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2021. Disponível em <<https://canalfornecedor.petrobras.com.br/regras-de-contratacao/catalogo-de-padronizacao>> acesso em 10/06/25.

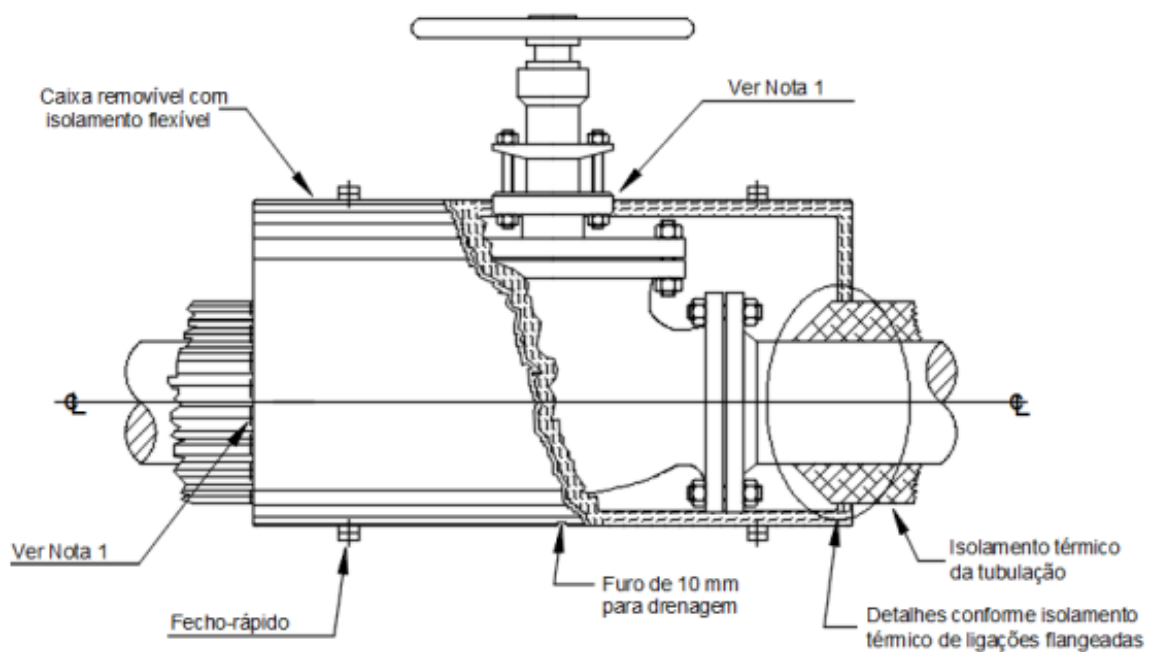
PETROBRAS. **N-550: Projeto de isolamento térmico**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2020. Disponível em < <https://canalfornecedor.petrobras.com.br/regras-de-contratacao/catalogo-de-padronizacao>> acesso em 10/06/25.

MONTEGUTTI, Marilise Cristine; ANTUNES JUNIOR, Claudio. **ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS ISOLANTES**. 2016. 11 f. Iniciação Científica (Graduação) - Fae Centro Universitário, [S.l.], 2016. Disponível em <<https://www.conic-semesp.org.br/anais/files/2016/trabalho-1000021757.pdf>> Acesso em: 16/07/2025.

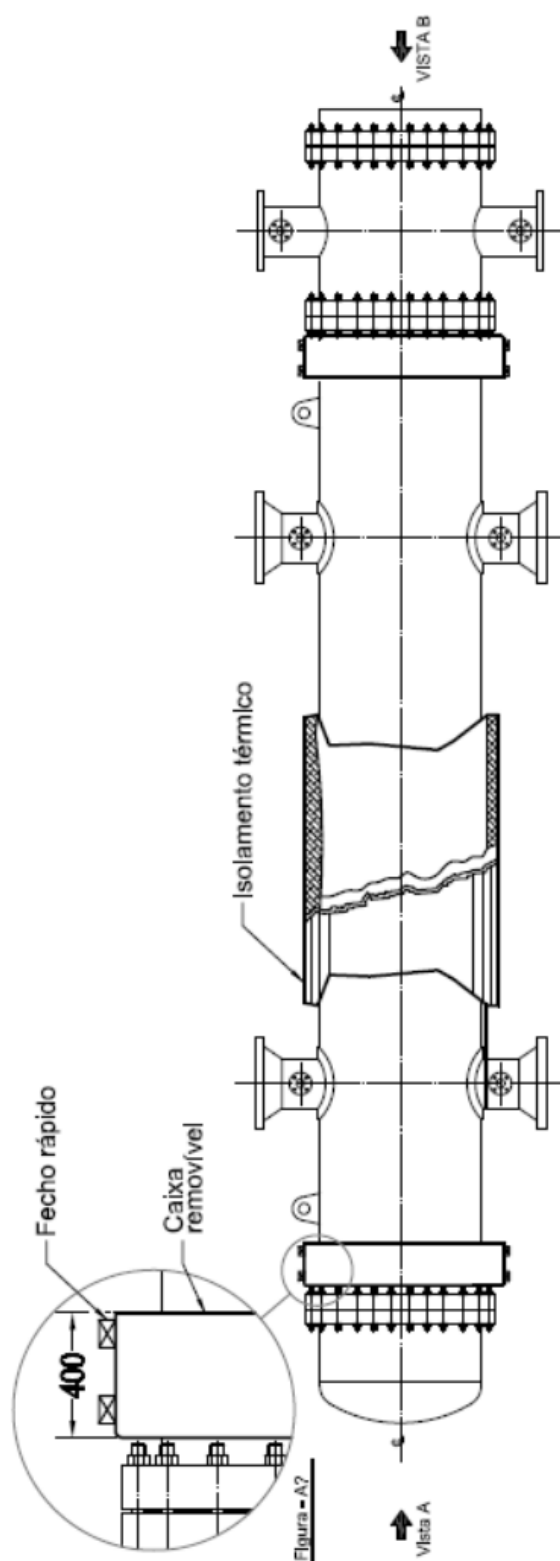
IBEC – Instituto Brasileiro de Engenharia de Custos. **Tabela de honorários profissionais e critérios para cálculo de BDI**. Rio de Janeiro: IBEC, 2019. 49 p. Disponível em < <https://ibecensino.org.br/category/materiais-gratuitos/>> acesso em / 10/06/25.

ANEXO A - MONTAGEM DO ISOLAMENTO TÉRMICO EM TUBULAÇÕES

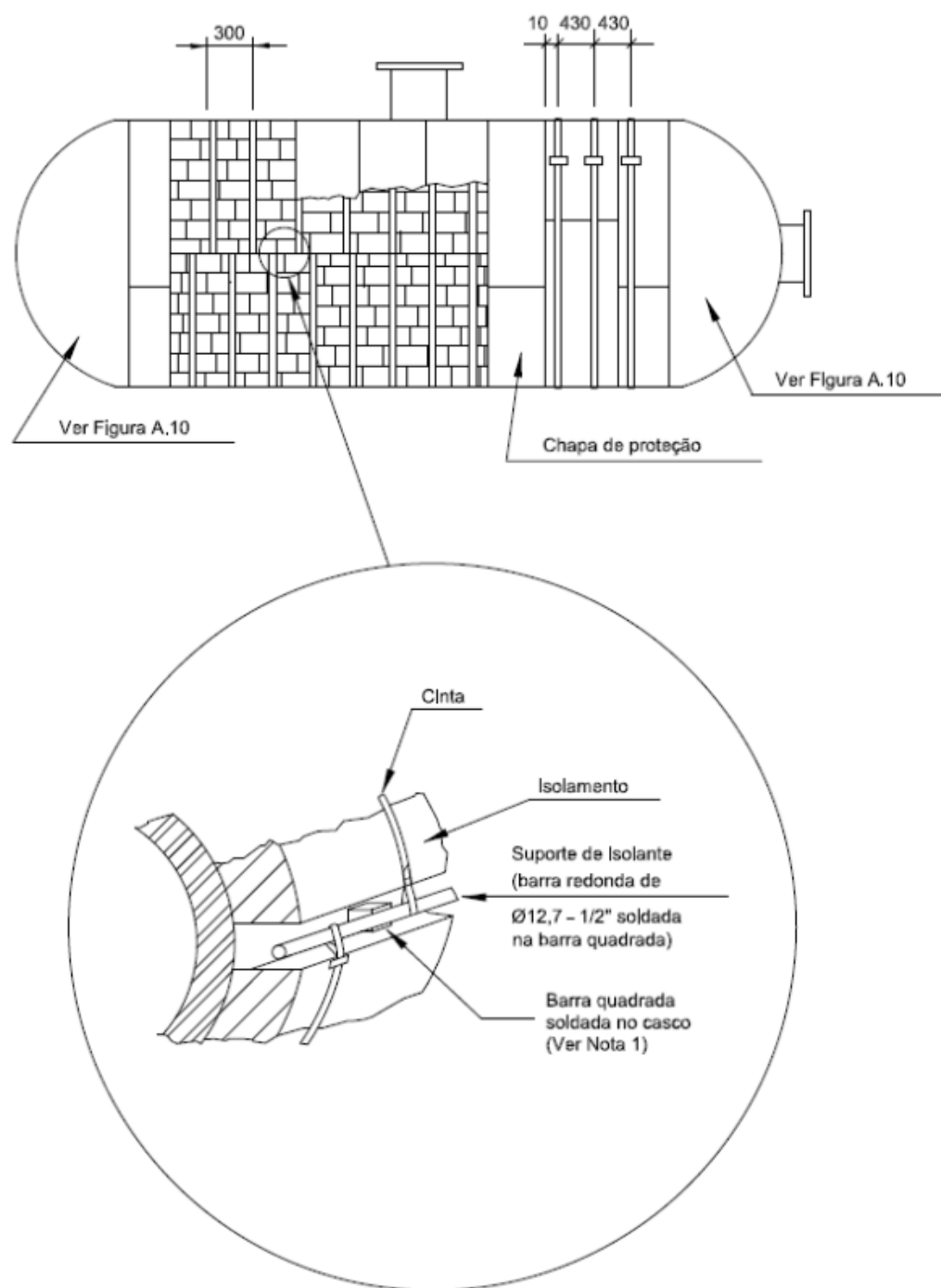
Fonte: PETROBRAS N-250 (2021, p. 25)

ANEXO B - MONTAGEM DO ISOLAMENTO TÉRMICO EM VÁLVULAS

Fonte: PETROBRAS N-250 (2021, p. 28)

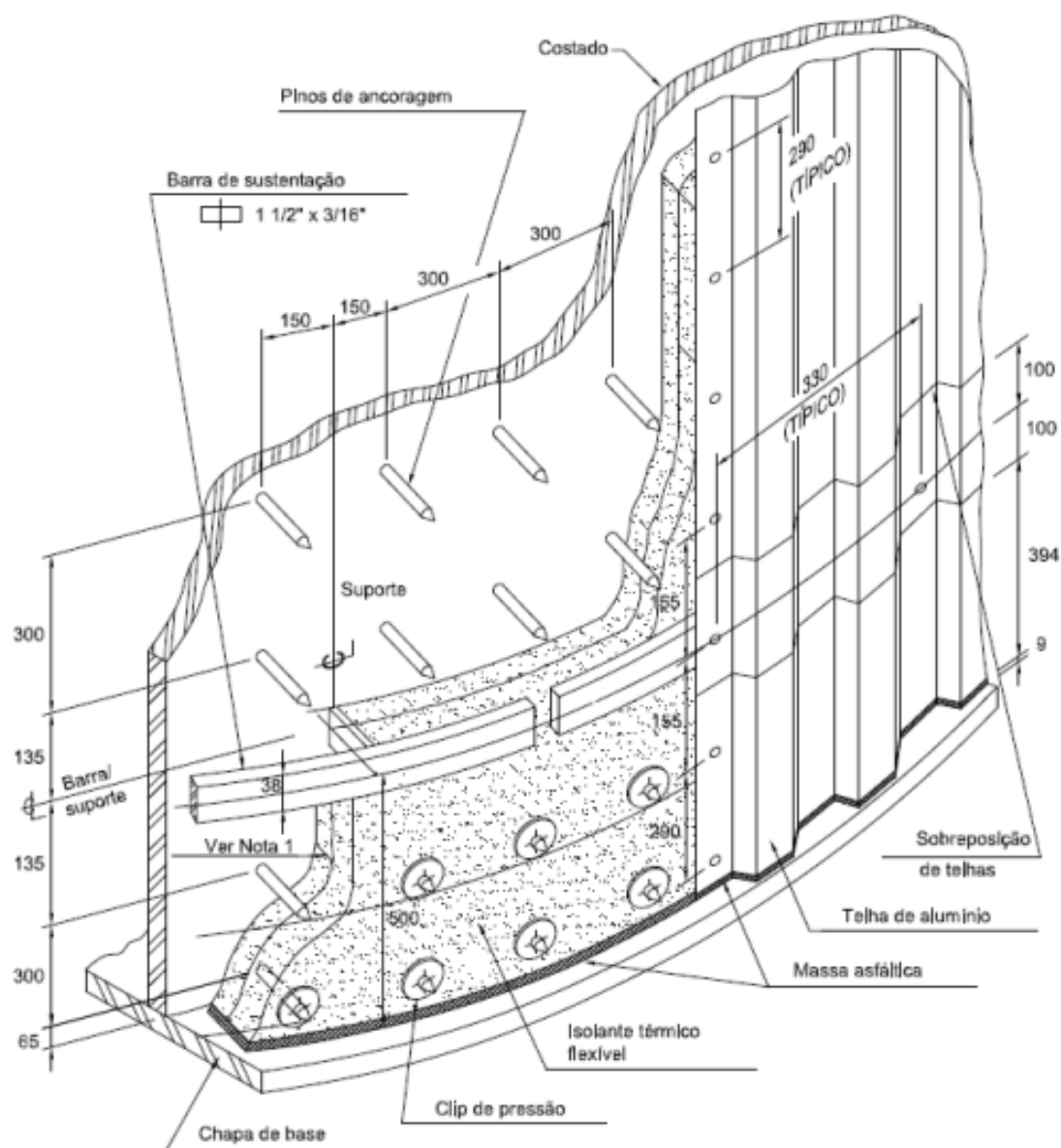
ANEXO C - MONTAGEM DO ISOLANTE EM TROCADORES DE CALOR

Fonte: PETROBRAS N-250 (2021, p. 39)

ANEXO D - MONTAGEM DO ISOLANTE EM VASOS DE PRESSÃO

Fonte: PETROBRAS N-250 (2021, p. 33)

ANEXO E - MONTAGEM DO ISOLAMENTO TÉRMICO EM TANQUES



Fonte :PETROBRAS N-250 (2021, p. 54)