

PROJETO DE ISOLAMENTO TÉRMICO A ALTA TEMPERATURA

Procedimento

Esta Norma substitui e cancela a sua revisão anterior.

- Indicação de item, tabela ou figura de conteúdo alterado em relação à revisão anterior.

Cabe à CONTEC - Subcomissão Autora, a orientação quanto à interpretação do texto desta Norma. O Órgão da PETROBRAS usuário desta Norma é o responsável pela adoção e aplicação dos itens da mesma.

Requisito Mandatório: Prescrição estabelecida como a mais adequada e que deve ser utilizada estritamente em conformidade com esta Norma. Uma eventual resolução de não segui-la ("não-conformidade" com esta Norma) deve ter fundamentos técnico-gerenciais e deve ser aprovada e registrada pelo Órgão da PETROBRAS usuário desta Norma. É caracterizada pelos verbos: "dever", "ser", "exigir", "determinar" e outros verbos de caráter impositivo.

Prática Recomendada (não-mandatória): Prescrição que pode ser utilizada nas condições previstas por esta Norma, mas que admite (e adverte sobre) a possibilidade de alternativa (não escrita nesta Norma) mais adequada à aplicação específica. A alternativa adotada deve ser aprovada e registrada pelo Órgão da PETROBRAS usuário desta Norma. É caracterizada pelos verbos: "recomendar", "poder", "sugerir" e "aconselhar" (verbos de caráter não-impositivo). É indicada pela expressão: **[Prática Recomendada]**.

Cópias dos registros das "não-conformidades" com esta Norma, que possam contribuir para o aprimoramento da mesma, devem ser enviadas para a CONTEC - Subcomissão Autora.

As propostas para revisão desta Norma devem ser enviadas à CONTEC - Subcomissão Autora, indicando a sua identificação alfanumérica e revisão, o item a ser revisado, a proposta de redação e a justificativa técnico-econômica. As propostas são apreciadas durante os trabalhos para alteração desta Norma.

"A presente norma é titularidade exclusiva da PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. - PETROBRAS, de uso interno na Companhia, e qualquer reprodução para utilização ou divulgação externa, sem a prévia e expressa autorização da titular, importa em ato ilícito nos termos da legislação pertinente, através da qual serão imputadas as responsabilidades cabíveis. A circulação externa será regulada mediante cláusula própria de Sigilo e Confidencialidade, nos termos do direito intelectual e propriedade industrial."

CONTEC

Comissão de Normas
Técnicas

SC - 09

Isolamento Térmico
e Refratários

Apresentação

As normas técnicas PETROBRAS são elaboradas por Grupos de Trabalho – GTs (formados por especialistas da Companhia e das suas Subsidiárias), são comentadas pelos Representantes Locais (representantes das Unidades Industriais, Empreendimentos de Engenharia, Divisões Técnicas e Subsidiárias), são aprovadas pelas Subcomissões Autoras – SCs (formadas por técnicos de uma mesma especialidade, representando os Órgãos da Companhia e as Subsidiárias) e aprovadas pelo Plenário da CONTEC (formado pelos representantes das Superintendências dos Órgãos da Companhia e das suas Subsidiárias, usuários das normas). Uma norma técnica PETROBRAS está sujeita a revisão em qualquer tempo pela sua Subcomissão Autora e deve ser reanalisada a cada 5 (cinco) anos para ser revalidada, revisada ou cancelada. As normas técnicas PETROBRAS são elaboradas em conformidade com a norma PETROBRAS N-1. Para informações completas sobre as normas técnicas PETROBRAS, ver Catálogo de Normas Técnicas PETROBRAS.

PÁGINA EM BRANCO



Documents

Document Sharing Hub

SUMÁRIO

1 OBJETIVO	5
2 DOCUMENTOS COMPLEMENTARES.....	5
3 DEFINIÇÕES	5
3.1 ALTA TEMPERATURA	5
3.2 ISOLANTE.....	6
3.3 ISOLAMENTO TÉRMICO	6
3.4 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	6
3.5 PROTEÇÃO OU CONFORTO PESSOAL	6
3.6 ESTABILIZAÇÃO DE FASES DE PROCESSOS INDUSTRIAIS.....	6
3.7 MANUTENÇÃO DA FLUIDEZ DO PRODUTO	6
4 CONDIÇÕES GERAIS.....	6
4.1 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO.....	6
4.2 MATERIAIS	7
4.3 EQUIPAMENTOS E TUBULAÇÕES	8
5 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS.....	11
5.1 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA	11
5.2 PROTEÇÃO E/OU CONFORTO PESSOAL.....	11
5.3 ESTABILIZAÇÃO DE FASES DE PROCESSOS INDUSTRIAIS.....	11
5.4 MANUTENÇÃO DE FLUIDEZ DE PRODUTO EM TUBULAÇÕES.....	11
ANEXO A - CONSERVAÇÃO DE ENERGIA - ROTEIRO DE CÁLCULO	13
ANEXO B - PROTEÇÃO PESSOAL - ROTEIRO DE CÁLCULO	21
ANEXO C - ESTABILIZAÇÃO DE FASES DE PROCESSOS INDUSTRIAIS ROTEIRO DE CÁLCULO.....	27
ANEXO D - MANUTENÇÃO DE FLUIDEZ DE PRODUTOS EM TUBULAÇÕES - ROTEIRO DE CÁLCULO	33
ANEXO E - EQUAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	41
ANEXO F - NOMENCLATURA.....	47
ANEXO G - CONSERVAÇÃO DE ENERGIA - TABELA DE ESPESSURAS	49
ANEXO H - PROTEÇÃO PESSOAL - TABELAS DE ESPESSURAS	53

/OBJETIVO**Documents**

Document Sharing Hub

PÁGINA EM BRANCO



Documents

Document Sharing Hub

1 OBJETIVO

- 1.1 Esta Norma fixa as condições exigíveis para o projeto de isolamento térmico de tubulações, vasos de pressão, torres, permutadores de calor, caldeiras, tanques, bombas e turbinas operando a alta temperatura.

1.2 Esta Norma se aplica na seleção de material e no dimensionamento de espessura de isolante térmico, de acordo com os seguintes critérios:

- a) conservação de energia calorífica;
- b) proteção ou conforto pessoal;
- c) estabilização de fases de processos industriais;
- d) manutenção de fluidez de produto em tubulações.

- 1.3 Esta Norma se aplica a projetos iniciados a partir da data de sua edição e também a instalações/equipamentos já existentes, quando da sua manutenção ou reforma.

2 DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

Os documentos relacionados a seguir são citados no texto e contêm prescrições válidas para a presente Norma.

2.1 Referências Normativas

- PETROBRAS [N-250](#) - Montagem de Isolamento Térmico a Alta Temperatura;
- PETROBRAS [N-1618](#) - Materiais para Isolação Térmica.

2.2 Bibliografia

- PEDROSA JÚNIOR, O.A. & PASQUALINI, Alberto - Isolamento Térmico Econômico em Múltiplas Camadas - 3º Congresso de Utilidades (SP, novembro de 1981);
- INCROPERA, F.P. & DE WITT, D.T. - Fundamentals of Heat Transfer.

3 DEFINIÇÕES

Para os efeitos desta Norma são adotadas as definições a seguir:

3.1 Alta Temperatura

Toda temperatura de operação acima da temperatura média das máximas temperaturas ambiente(s) nos dois (2) meses mais quentes do ano.

3.2 Isolante

Material empregado para reduzir a transferência de calor.

■ 3.3 Isolamento Térmico

É o conjunto de materiais que, aplicados, reduz a transferência de calor.

3.4 Conservação de Energia

Critério para determinação da espessura econômica do(s) isolante(s), levando-se em consideração os custos de energia perdida, do investimento no isolamento térmico e de manutenção, objetivando a minimização do custo total.

3.5 Proteção ou Conforto Pessoal

Critério para determinação da espessura do(s) isolante(s) que tem por objetivo evitar danos ou desconforto pessoal.

3.6 Estabilização de Fases de Processos Industriais

Critério para determinação da espessura do(s) isolante(s) levando-se em consideração o valor máximo admissível para a perda térmica (fluxo de calor), em função das necessidades e limitações de um determinado processo industrial.

3.7 Manutenção da Fluidez do Produto

Critério para a determinação da espessura do(s) isolante(s), com o objetivo de manter a temperatura do fluido acima de seu ponto de fluidez.

4 CONDIÇÕES GERAIS

4.1 Critérios de Dimensionamento

4.1.1 O critério básico para determinação da espessura do(s) isolante(s) deve ser o de conservação de energia.

4.1.2 Quando houver mais de um motivo de dimensionamento, devem ser calculadas as espessuras de acordo com os critérios correspondentes e usada aquela que apresentar o maior valor.

4.2 Materiais

4.2.1 Os materiais a serem utilizados devem ser os padronizados pela norma PETROBRAS [N-1618](#), respeitando-se as limitações de uso nela descritas.

4.2.2 Os materiais devem ser aplicados em conformidade com a norma PETROBRAS [N-250](#).

4.2.3 Para um mesmo tipo de material, recomenda-se que a distribuição das camadas de isolante térmico rígido seja feita em conformidade com a TABELA 1.

**TABELA 1 - DISTRIBUIÇÃO DAS ESPESSURAS DAS
CAMADAS DE ISOLANTE TÉRMICO RÍGIDO**

ESPESSURA TOTAL (mm)	CAMADAS					
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª
25	25					
38	38					
51	51					
63	63					
76	38	38				
89	51	38				
102	51	51				
114	63	51				
126	63	63				
140	51	51	38			
153	51	51	51			
165	63	51	51			
177	63	63	51			
189	63	63	63			
204	51	51	51	51		
216	63	51	51	51		
228	63	63	51	51		
240	63	63	63	51		
252	63	63	63	63		
267	63	51	51	51	51	
279	63	63	51	51	51	
291	63	63	63	51	51	
303	63	63	63	63	51	
315	63	63	63	63	63	
330	63	63	51	51	51	51
342	63	63	63	51	51	51
354	63	63	63	63	51	51
366	63	63	63	63	63	51
378	63	63	63	63	63	63

Nota: A TABELA acima foi desenvolvida para espessura máxima de 63 mm e sempre que possível, utilizar o menor número de camadas usando isolante de maior espessura.

4.2.4 Devem ser previstas juntas de expansão-contração para o isolante térmico rígido, em conformidade com a norma PETROBRAS [N-250](#).

4.2.5 Para tubulações ou equipamentos de aço liga ASTM A 240, tipos 300 e 400, o teor máximo de cloretos e fluoretos no isolante deve atender os critérios da ASTM C 795, a fim de minimizar a possibilidade de corrosão sob tensão.

4.2.6 Deve ser feito um estudo econômico, objetivando analisar a conveniência de ser usado mais de um tipo de material isolante para o isolamento de um mesmo equipamento ou tubulação.

4.2.7 Nos casos dos equipamentos e tubulações que sejam submetidos as condições de alta e baixa temperatura, consultar a norma PETROBRAS [N-894](#).

4.3 Equipamentos e Tubulações

4.3.1 A menos que seja recomendado pelo projetista do sistema, não se deve isolar partes de tubulação ou de equipamento nas seguintes situações:

- a) se a perda de calor for necessária, atendendo à necessidade de processo;
- b) bombas operando em temperaturas abaixo de 60°C, exceto se o fluido bombeado tiver um ponto de fluidez acima da temperatura ambiente;
- c) compressores alternativos, centrífugos e rotativos;
- d) válvulas, flanges de linha e conexões flangeadas em sistemas de efluentes de produtos de processo;
- e) tubulações e equipamentos aquecidos intermitentemente, tais como:
 - válvulas de alívio e sistemas de alívio (a menos que operando com produto de elevado ponto de fluidez);
 - respiros e drenos;
 - sistema de tocha;
 - sistema de drenagem;
- f) conexões do tipo união, em tubulação;
- g) purgadores de vapor;
- h) misturadores;
- i) juntas de expansão;
- j) indicadores visuais de fluxo;
- l) mangueiras;
- m) resfriadores e condensadores, juntamente com as tubulações associadas aos mesmos;
- n) placa de identificação ou outras;
- o) bocais flangeados com comprimento igual ou menor que 300 mm;
- p) suportes de tubulações ou equipamentos.

4.3.2 As espessuras dos isolantes devem ser calculadas conforme um dos critérios estabelecidos no item 5.

4.3.3 Materiais flexíveis são recomendados para isolamento de tanques de armazenamento e para caixas bipartidas no isolamento de bombas, turbinas, acessórios de tubulações, tampos e flanges de permutadores de calor. Não são recomendados para tubulações e equipamentos sujeitos a vibrações e ou locais onde for exigida resistência mecânica.

4.3.4 Tubulações e equipamentos que necessitem ser protegidos contra fogo, principalmente dentro dos limites das Unidades de Processo, devem ser isolados termicamente utilizando-se como camada de base um dos seguintes isolantes:

- a) sílica diatomácea;
- b) silicato de cálcio;
- c) lã cerâmica.

Nota: Este item não se aplica para o isolamento térmico de bombas, turbinas, acessórios de tubulação, tampos e flanges de permutadores de calor, cujo isolante é contido em caixas bipartidas.

4.3.5 A seleção dos isolantes deve seguir a TABELA 2.

TABELA 2 - SELEÇÃO DO ISOLANTE A SER UTILIZADO

	EQUIPAMENTOS OU TUBULAÇÕES						
	TANQUES		TUBULAÇÕES		TORRES, VASOS E PERMUTADORES DE CALOR	BOMBAS, TURBINAS E ACESSÓRIOS DE TUBULAÇÃO	CALDEIRAS
	TETO	COSTADO	AÉREAS	ENTERRADAS			
LÃ DE VIDRO, LÃ DE ROCHA E LÃ CERÂMICA EM MANTA			X		X	X	X
SILICATO DE CÁLCIO	X	X	X	X	X	X	X
LÃ DE VIDRO EM FELTRO DE LAMELAS	X	X	X	X	X		
ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO	X	X	X	X			
LÃ DE VIDRO, LÃ DE ROCHA E LÃ CERÂMICA EM PAINEL		X			X		X
SÍLICA DIATOMÁCEA	X	X	X	X	X	X	X
LÃ DE VIDRO, LÃ DE ROCHA E LÃ CERÂMICA EM TUBO			X	X			
LÃ DE VIDRO, LÃ DE ROCHA E LÃ CERÂMICA EM FLOCOS EMBALADOS EM SACOS TÉRMICOS OU NÃO			(1)			X	

Nota: (1) -Para Válvulas.

5 CONDIÇÕES ESPECÍFICAS

5.1 Conservação de Energia

Para a determinação da espessura econômica, recomenda-se que seja efetuado um estudo específico com base em dados atualizados de acordo com o roteiro de cálculos do ANEXO A. A TABELA G-1 do ANEXO G apresenta valores de espessura para o silicato de cálcio.

5.2 Proteção e/ou Conforto Pessoal

5.2.1 O isolamento deve garantir na superfície externa uma temperatura abaixo de 60°C.

5.2.2 O isolamento deve ser feito em equipamentos ou tubulações localizados a uma altura inferior a 2 metros de qualquer piso, ou a uma distância lateral inferior a 1 metro de escadas ou plataformas destinadas ao trânsito de pessoal.

5.2.3 Se não for permitido o isolamento, por problemas operacionais, devem ser providenciados protetores metálicos (telas) e até sinalização adequada, que limitem o acesso de pessoas à superfície externa não isolada.

5.2.4 Para a determinação da espessura para proteção pessoal, recomenda-se o uso do roteiro de cálculo do ANEXO B. As TABELAS H-1 e H-2, do ANEXO H, apresentam valores de espessura para o silicato de cálcio e lã de vidro, respectivamente.

5.3 Estabilização de Fases de Processos Industriais

Para a determinação da espessura para estabilização de fases de processos industriais recomenda-se o uso do roteiro de cálculo do ANEXO C.

5.4 Manutenção de Fluidez de Produto em Tubulações

5.4.1 O isolamento deve ser projetado de tal forma que a temperatura do produto no final da linha seja, no mínimo, 10°C acima do seu ponto de fluidez.

5.4.2 Para a determinação da espessura para manutenção da fluidez do produto na tubulação recomenda-se o uso do roteiro de cálculo do ANEXO D.

Nota: Para situações em que o processo exija temperatura mínima para o fluido, pode ser utilizado o mesmo roteiro do ANEXO D.

ANEXO A - CONSERVAÇÃO DE ENERGIA - ROTEIRO DE CÁLCULO

A-1 INTRODUÇÃO

A-1.1 O cálculo de espessura do isolamento pelo critério de conservação de energia visa obter um sistema de isolamento térmica que, respeitadas as restrições de segurança e de processo, promova um benefício econômico com a redução da perda de calor através das paredes de uma tubulação ou equipamento. Por ser um cálculo que envolve custos de material, manutenção e energia, o conceito de "solução mais econômica" pode variar ao longo do tempo.

A-1.2 A partir de espessuras definidas pelos critérios de proteção pessoal, estabilização de fases e manutenção da fluidez, deve ser feito um balanço entre o custo adicional de material e a redução do custo de energia térmica decorrentes de um aumento da espessura do isolamento. Para tanto, é necessário calcular-se a perda de calor para cada nova espessura analisada, o que requer um cálculo iterativo. O roteiro aqui apresentado é apenas uma das formas de determinação das espessuras.

A-1.3 O cálculo de custos foi baseado no artigo "Isolamento Térmico Econômico em Múltiplas Camadas". (Ver Capítulo 2).

A-2 DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE CALOR

A-2.1 Definir uma configuração de espessuras e materiais.

A-2.2 Estimar um valor para a temperatura da superfície externa do isolamento, por exemplo, o mesmo valor usado no cálculo para proteção pessoal.

A-2.3 Calcular os coeficientes de transferência de calor adequados ao problema, segundo ANEXO E.

A-2.4 Calcular o fluxo de calor:

$$q = (h_c + h_r)(T_e - T_a)$$

A-2.5 Para cada material, partindo da superfície externa do equipamento:

- a) com a temperatura em uma das faces (T_1), estimar a temperatura na outra face (T_2); no caso da última camada ou de camada única, usar a temperatura da superfície externa do isolamento estimada em A-2.2;
- b) com a temperatura média $(T_1+T_2)/2$, calcular a condutividade térmica do material;
- c) calcular a nova temperatura T_2 através da equação (E-4) ou (E-6);
- d) se o novo valor de T_2 diferir em mais de 2°C do estabelecido anteriormente, retornar a b com esse novo T_2 ;

A-2.6 Se o valor de T_2 do último material diferir em mais de 2°C do valor de T_e estabelecido anteriormente, retornar ao item A-2.3 com um valor intermediário. Essa nova iteração não precisa ser feita se os valores dos fluxos de calor das duas últimas iterações diferirem em menos de 5%.

Nota: O procedimento de cálculo apresentado aqui não tem convergência muito fácil, exigindo cuidado nas estimativas de T_e para reduzir o número de iterações, em especial quando o cálculo é feito manualmente.

A-3 DETERMINAÇÃO DOS CUSTOS

O cálculo do custo total de um sistema de isolamento térmico é composto por três parcelas:

- a) custo de energia perdida;
- b) custo de investimento no isolamento;
- c) custo de manutenção do isolamento.

Os custos podem ser feitos por unidade de área ou comprimento ou pelo total da instalação.

A-3.1 Custo de Energia Perdida

O custo anual de energia perdida pode ser avaliado pela seguinte expressão:

$$CE = \frac{3600 \cdot Q \cdot N \cdot F}{\eta} \quad (\text{A.1})$$

Onde: CE = custo anual de energia perdida, $\$/\text{ano.m}^2$, $\$/\text{ano.m}$ ou $\$/\text{ano}$;

Q = quantidade de calor perdido, W/m^2 , W/m ou W ;

N = número de horas de operação num ano, h/ano;

F = custo do combustível, $\$/\text{J}$;

η = eficiência do sistema de conversão de combustível em calor.

Este custo, que se repete ao longo da vida do sistema de isolamento, deve ser trazido para seu valor atual:

$$CE_{VA} = f(j, n) \cdot CE \quad (A.2)$$

$$f(j, n) = \frac{(1+j)^n - 1}{j \cdot (1+j)^n} \quad (A.3)$$

$$j = \frac{1+i}{1+\Delta} - 1 \quad (A.4)$$

Onde: CE_{VA} = custo atualizado de energia perdida, \$/m², \$/m ou \$;

$f(j, n)$ = fator de atualização;

n = vida do sistema de isolamento, em anos;

i = taxa de atratividade anual; geralmente, adota-se 15%;

Δ = taxa de crescimento diferenciado do custo de energia, ou seja, taxa de crescimento anual do preço do combustível em relação a moeda considerada.

A-3.2 Custo de Investimento no Isolamento

O custo de investimento no isolamento, CI (\$/m², \$/m ou \$), deve considerar os gastos com material isolante, materiais de fixação e de proteção e custo de instalação (pessoal, equipamentos, etc.), no início da vida útil do sistema.

A-3.3 Custo de Manutenção do Isolamento

O custo de manutenção do isolamento é usualmente considerado como um percentual do investimento no isolamento.

$$CM = tm \cdot CI \quad (A.5)$$

Onde: CM = custo anual de manutenção, \$/ano.m², \$/ano.m ou \$/ano;

tm = percentual de custo de manutenção; geralmente, adota-se 2%.

Este custo, que se repete ao longo da vida do sistema de isolamento, deve ser trazido para seu valor atual:

$$CM_{VA} = f(i, n) \cdot CM = f(i, n) \cdot tm \cdot CI \quad (A.6)$$

$$f(i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \quad (A.7)$$

Onde: CM_{VA} = custo atualizado de manutenção, \$/m², \$/m ou \$.

A-3.4 Custo Total do Isolamento

O custo total do isolamento será dado por:

$$CT = CE_{VA} + CI + CM_{VA}$$

ou

$$CT = CE_{VA} + CI \cdot [1 + tm \cdot f(i, n)] \quad (A.8)$$



A-4 DETERMINAÇÃO DA "ESPESSURA ECONÔMICA"

A-4.1 A determinação da "espessura econômica" consiste em se verificar para que espessura o custo total é menor. Assim, é necessário determinar, para várias espessuras e materiais, a perda de calor para o ambiente, segundo o item A-2, e o custo total associado, segundo o item A-3, para então fazer uma comparação entre as várias soluções analisadas.

A-4.2 Os parâmetros utilizados para a determinação dos custos, tais como custos do combustível e do isolamento, devem se basear em valores históricos, para se procurar obter uma seleção válida para toda a vida do isolamento. Devem ser analisados, ainda, fatores que não podem ser quantificados no custo (por exemplo, disponibilidade no estoque).

A-5 EXEMPLO DE CÁLCULO

Determinar a espessura econômica do isolamento de um tanque, considerando-o como uma superfície plana de 10m de comprimento. A temperatura interna é 300°C e a ambiente é 24°C. Assume-se emissividade 0,2 para o alumínio e ventos de 2 m/s (convecção forçada). Considerar os parâmetros para os custos conforme ANEXO G. De cálculo prévio para proteção pessoal, foi determinado que a espessura mínima deverá ser 89mm de silicato de cálcio, com um fluxo de calor de 204,8 W/m². Considerar as seguintes condutividades térmicas:

$$\begin{array}{ll} 0,072 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C} & @ 150^{\circ}\text{C} \\ 0,092 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C} & @ 300^{\circ}\text{C} \end{array}$$

Dados:

$$T_o = 300^{\circ}\text{C} \quad T_a = 24^{\circ}\text{C} \quad L_c = 10 \text{ m} \quad v = 2 \text{ m/s} \quad \varepsilon = 0,2$$

A-5.1 Determinação do Fluxo de Calor

Passo 1: A próxima espessura comercial é 102mm;

Passo 2: $T_{e, \text{est}} = 60^{\circ}\text{C}$;

Passo 3: $T_{a,} = 24^{\circ}\text{C} \quad \therefore \quad \bar{T} = (T_e + T_a)/2 = 42^{\circ}\text{C}$

propriedades do ar:

da TABELA E-3 $k = 0,0274 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$

$\nu = 17,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$Pr = 0,705$

coeficiente de transferência de calor por convecção:

do item E-4.1: $L_c = 10 \text{ m}$

$$Re = \frac{vL_c}{\nu} = 1,15 \cdot 10^6$$



$$\therefore h_c = \frac{k}{L_c} (0,037 Re^{0,8} - 871) Pr^{0,33} = 4,24 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

coeficiente de transferência de calor por radiação:

do item E-1:

$$h_r = 5,669 \cdot 10^{-8} \varepsilon \left[(T_e + 273)^2 + (T_a + 273)^2 \right] (T_e + T_a + 546)$$

$$\therefore h_r = 1,42 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Passo 4: $q = (h_c + h_r) \cdot \Delta t = 203,8 \text{ W/m}^2$

Passo 5: $T_1 = 300^\circ\text{C} \quad T_2 = T_e = 60^\circ\text{C}$

$$\bar{T} = (T_1 + T_2) / 2 = 180^\circ\text{C} \quad k = 0,076 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

da equação (E-4):

$$T_e = T_o - q \frac{L}{k} = 26^\circ\text{C}$$

Passo 6: Retorna ao passo 3 com um valor intermediário: $T_{e, \text{est}} = 50^\circ\text{C}$

Passo 3: $\bar{T} = (T_e + T_a) / 2 = 37^\circ\text{C}$

$$\therefore k = 0,0270 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C} \quad v = 16,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad Pr = 0,706$$

$$Re = \frac{v L_c}{\nu} = 1,18 \cdot 10^6 \quad \therefore h_c = 4,32 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$h_r = 1,35 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Passo 4: $q = (h_c + h_r) \cdot \Delta t = 147,5 \text{ W/m}^2$

Passo 5: $T_1 = 300^\circ\text{C} \quad T_2 = T_e = 50^\circ\text{C}$

$$\bar{T} = (T_1 + T_2) / 2 = 175^\circ\text{C} \quad k = 0,075 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$T_e = T_o - q \frac{L}{k} = 100^\circ\text{C}$$

Passo 6: O novo resultado não atende ao critério de temperatura nem ao de fluxo de calor. Vamos buscar um novo valor para T_e , baseado nas iterações anteriores, conforme figura abaixo. Retorna-se ao passo 3 com $T_{e, \text{est}} = 54^\circ\text{C}$. (Ver FIGURA A-1).

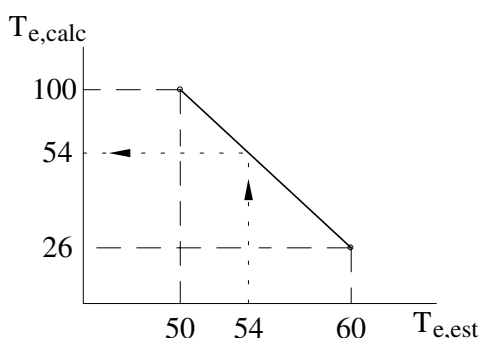


FIGURA A-1