

N-894**REV. E****06 / 2012****CONTEC**Comissão de Normalização
Técnica**SC-09**Isolamento Térmico e
Refratários**Projeto de Isolamento Térmico a
Baixa Temperatura**

Revalidação

Revalidada em 05/2022.

Projeto de Isolamento Térmico a Baixa Temperatura

Procedimento

Esta Norma substitui e cancela a sua revisão anterior.

Cabe à CONTEC - Subcomissão Autora, a orientação quanto à interpretação do texto desta Norma. A Unidade da PETROBRAS usuária desta Norma é a responsável pela adoção e aplicação das suas seções, subseções e enumerações.

Requisito Técnico: 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 pela Unidade da PETROBRAS usuária desta Norma. É caracterizada por verbos de caráter impositivo.

Prática Recomendada: 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 pela Unidade da PETROBRAS usuária desta Norma. É caracterizada por 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 seu aprimoramento, 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, a seção, subseção e enumeração a ser revisada, 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 PETROBRAS, 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."

Apresentação

As Normas Técnicas PETROBRAS são elaboradas por Grupos de Trabalho - GT (formados por Técnicos Colaboradores especialistas da Companhia e de suas Subsidiárias), são comentadas pelas Unidades da Companhia e por suas Subsidiárias, são aprovadas pelas Subcomissões Autoras - SC (formadas por técnicos de uma mesma especialidade, representando as Unidades da Companhia e as Subsidiárias) e homologadas pelo Núcleo Executivo (formado pelos representantes das Unidades da Companhia e das Subsidiárias). Uma Norma Técnica PETROBRAS está sujeita a revisão em qualquer tempo pela sua Subcomissão Autora e deve ser reanalisada a cada 5 anos para ser revalidada, revisada ou cancelada. As Normas Técnicas PETROBRAS são elaboradas em conformidade com a Norma Técnica PETROBRAS N-1. Para informações completas sobre as Normas Técnicas PETROBRAS, ver Catálogo de Normas Técnicas PETROBRAS.

Sumário

1	Escopo.....	5
2	Referências Normativas	5
3	Termos e Definições.....	5
4	Condições Gerais	6
4.1	Critério de Dimensionamento.....	6
4.2	Materiais.....	6
4.3	Equipamentos e Tubulações.....	7
5	Condições Específicas	9
5.1	Conservação de Energia.....	9
5.2	Controle de Condensação de Umidade na Superfície Externa do Isolamento Térmico	9
5.3	Proteção ou Conforto Pessoal	9
5.4	Estabilização de Fases de Processos Industriais.....	10
	Anexo A - Conservação de Energia - Roteiro de Cálculo	11
A.1	Introdução	11
A.2	Determinação do Fluxo de Calor.....	11
A.3	Determinação dos Custos	12
A.3.1	Custo de Energia Absorvida.....	12
A.3.2	Custo da Água de Refrigeração	12
A.3.3	Custo de Investimento na Unidade de Refrigeração.....	13
A.3.4	Custo de Investimento no Isolamento Térmico	13
A.3.5	Custo de Manutenção do Isolamento Térmico.....	13
A.3.6	Custo Total do Isolamento Térmico.....	13
A.4	Determinação da “Espessura Econômica”	13
A.5	Exemplo de Cálculo.....	14
A.5.1	Determinação do Fluxo de Calor (1ª Etapa).....	14
A.5.2	Determinação dos Custos (2ª Etapa).....	15
	Anexo B - Controle de Condensação de Umidade na Superfície Externa do Isolamento Térmico e Proteção Pessoal - Roteiro de Cálculo	16
B.1	Introdução	16

B.2 Superfícies Planas	16
B.3 Superfícies Cilíndricas ou Esféricas	16
B.4 Exemplo de Cálculo	17
Anexo C - Estabilização de Fases de Processos Industriais - Roteiro de Cálculo	20
C.1 Introdução	20
C.2 Superfícies Planas	20
C.3 Superfícies Cilíndricas ou Esféricas	20
C.4 Exemplo de Cálculo	21
Anexo D - Equações de Transferência de Calor	24
D.1 Radiação	24
D.2 Condução	24
D.2.1 Superfícies Planas	25
D.2.2 Superfícies Cilíndricas	25
D.2.3 Superfícies Esféricas	27
D.3 Convecção Natural	27
D.4 Convecção Forçada	28
D.5 Propriedades Físicas	30
Anexo E - Nomenclatura	31
Anexo F - Ponto	33
Anexo G - Conservação de Energia - Espessuras Recomendadas	34

Tabelas

Tabela 1 - Distribuição das Espessuras das Camadas de Isolantes Rígidos Pré-Moldados	7
Tabela 2 - Seleção do Isolante a Ser Utilizado	8
Tabela 3 - Classificação de Porte de Equipamento	9
Tabela A.1 - Exemplo de Cálculo - Resumo	15
Tabela D.1 - Correlações Para Convecção Natural	28
Tabela D.2 - Parâmetros “C” e “M”	29
Tabela D.3 - Propriedades do Ar	30
Tabela D.4 - Emissividades Típicas de Superfícies	30
Tabela E.1 - Nomenclatura	31

Tabela F.1 - Ponto de Orvalho	33
Tabela G.1 - Espessuras Econômicas, em mm, para Isolamento Térmico à Base de Poliuretano e Poliisocianurato Pré-Moldados e Poliuretano Injetado	35
Tabela G.2 - Valores de Referência do Custo do Isolamento Térmico à Base de Poliuretano e Poliisocianurato Pré-Moldados e Poliuretano Injetado	36

Figuras

Figura B.1 - Isolamento Térmico de Uma Tubulação	17
Figura C.1 - Isolamento Térmico de Uma Tubulação	22
Figura D.1 - Isolamento Térmico Simples em Superfície Plana	24
Figura D.2 - Isolamento Térmico em Parede de 3 Camadas em Superfície Plana	25
Figura D.3 - Isolamento Térmico Simples em Superfície Cilíndrica.....	26
Figura D.4 - Isolamento Térmico de Parede de 3 Camadas em Superfície Cilíndrica	26

1 Escopo

1.1 Esta Norma fixa as condições exigíveis no projeto de isolamento térmico de equipamentos e tubulações operando a baixa temperatura, não se aplicando porém, a serviços com temperaturas de operação abaixo de -100 °C.

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) controle de condensação de umidade na superfície externa do isolamento térmico;
- b) conservação de energia calorífica;
- c) estabilização de fases de processos industriais;
- d) proteção ou conforto pessoal.

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.

1.4 Esta Norma contém Requisitos Técnicos e Práticas Recomendadas.

2 Referências Normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação deste documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes dos referidos documentos.

PETROBRAS [N-896](#) - Montagem de Isolamento Térmico a Baixa Temperatura;

PETROBRAS [N-1618](#) - Material para Isolamento Térmico;

ASTM [C 795](#) - Standard Specification for Thermal Insulation for Use in Contact With Austenitic Stainless Steel.

ASTM [C 534](#) - Standard Specification for Preformed Flexible Elastomeric Cellular Thermal Insulation in Sheet and Tubular Form;

ASTM [C 1728](#) - Standard Specification for Flexible Aerogel Insulation.

3 Termos e Definições

Para os efeitos deste documento aplicam-se os seguintes termos e definições.

3.1

baixa temperatura

toda temperatura de operação igual ou inferior a média das máximas temperaturas ambiente nos dois meses mais quentes do ano

3.2

isolante térmico

material empregado para reduzir a transferência de calor

3.3

isolamento térmico

conjunto de materiais que, aplicado, reduz a transferência de calor

3.4**espessura econômica**

espessura obtida levando em consideração os custos da energia absorvida, do investimento no isolamento térmico e de manutenção, objetivando a minimização do custo total

3.5**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

3.6**controle de condensação de umidade na superfície externa do isolamento térmico**

critério para determinação da espessura do(s) isolante(s) que garanta a não condensação da umidade do ar na superfície do isolamento térmico da tubulação ou equipamento

3.7**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

3.8**proteção ou conforto pessoal**

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

4 Condições Gerais**4.1 Critério de Dimensionamento**

4.1.1 O critério básico para determinação da espessura do isolante térmico consiste na utilização dos conceitos de conservação de energia e de controle da condensação de umidade na superfície externa do isolamento térmico.

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 O material isolante normalmente utilizado é o poliuretano expandido (pré-moldado, projetado ou injetado) ou poliisocianurato (pré-moldado). Podem ser utilizados perlita expandida granular, espuma elastomérica, vidro celular ("cellular glass") e aerogel conforme projeto específico.

4.2.2 Os materiais isolantes utilizados devem estar de acordo com a PETROBRAS [N-1618](#), incluindo os seguintes materiais:

- a) espuma elastomérica, conforme a ASTM [C 534](#);
- b) aerogel, conforme a ASTM [C 1728](#)

4.2.3 O isolamento térmico deve ser aplicado conforme a PETROBRAS [N-896](#). Para aplicações não previstas na PETROBRAS [N-896](#), deve ser apresentado um procedimento de montagem específico conforme orientação do fabricante e montador.

4.2.4 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. **[Prática Recomendada]**

Tabela 1 - Distribuição das Espessuras das Camadas de Isolantes Rígidos Pré-Moldados

Espessura Total mm (pol)	Camadas mm (pol)	
	1ª	2ª
25 (1")	25 (1")	-
38 (1½")	38 (1½")	-
51 (2")	51 (2")	-
63 (2½")	38 (1½")	25 (1")
76 (3")	38 (1½")	38 (1½")
89 (3½")	51 (2")	38 (1½")
102 (4")	51 (2")	51 (2")
114 (4½")	63 (2½")	51 (2")
127 (5")	63 (2½")	63 (2½")
139 (5½")	76 (3")	63 (2½")
153 (6")	76 (3")	76 (3")
165 (6½")	89 (3½")	76 (3")
178 (7")	102 (4")	76 (3")
191 (7½")	102 (4")	89 (3½")
204 (8")	102 (4")	102 (4")

4.2.5 Devem ser previstas juntas de expansão-contração para o isolante térmico rígido, em conformidade com a PETROBRAS [N-896](#).

4.2.6 Para tubulações ou equipamentos de aço inoxidável das séries 300 e 400, o teor máximo de cloretos e fluoretos no isolante térmico deve atender aos critérios da ASTM [C 795](#), a fim de minimizar a possibilidade de corrosão sob tensão.

4.2.7 Nos casos em que o equipamento ou tubulação seja submetido a condições de alta e baixa temperatura deve-se utilizar, primeiramente, uma camada de isolante térmico rígido para alta temperatura, dimensionada de modo que a temperatura máxima de sua superfície externa seja inferior a 80 °C.

NOTA 1 O dimensionamento da espessura do isolante térmico para baixa temperatura não deve levar em consideração a influência da condutividade térmica do isolante térmico rígido para alta temperatura.

NOTA 2 Caso o equipamento ou tubulação seja submetido também a condição de alta temperatura e haja necessidade proteção pessoal (a quente), a temperatura máxima de sua superfície externa, considerando a última camada do isolamento térmico, não deve exceder 60 °C.

4.3 Equipamentos e Tubulações

4.3.1 A menos que seja recomendado pelo projetista do sistema ou exista risco de congelamento, não se deve isolar:

- a) se o ganho de calor for necessário, atendendo aos requisitos de processo;

b) tubulações e equipamentos resfriados esporadicamente, tais como:

- válvulas de alívio e sistemas de alívio;
- suspiros e drenos;
- sistema de tocha;
- sistema de drenagem;

c) mangueiras e mangotes.

4.3.2 O isolamento das peças de interferência de tubulações, equipamentos, volantes e hastes de válvulas devem atender ao previsto na PETROBRAS [N-896](#).

4.3.3 Os materiais aplicáveis para isolamento dos equipamentos e tubulações estão indicados na Tabela 2.

NOTA Deve ser feita uma análise técnica e econômica para a escolha do melhor material e método de aplicação.

Tabela 2 - Seleção do Isolante a Ser Utilizado

Material/ método de aplicação	Tubulações e acessórios		Tanques			Torres (Nota 4)		Trocadores e vasos (Notas 2 e 4)		Equipamentos rotativos	Esferas
	Aérea	Enterrada	Teto	Costado	Fundo	Pequeno	Médio e grande	Pequeno e médio	Grande		
Poliuretano injetado	X	X	X (Nota 1)	X (Nota 1)		X	X	X	X	X	X (Nota 1)
Poliuretano pulverizado (Nota 5)			X	X			X		X		X
Poliuretano pré- moldado	X	X	X	X	X (Nota 3)	X	X	X	X	X	X
Poliisocianurato pré-moldado	X	X	X	X	X (Nota 3)	X	X	X	X	X	X
Perlita expandida granular				X		X	X	X	X		
Vidro celular	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Espuma elastomérica	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
Aerogel	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
<p>NOTA 1 É permitida a injeção de poliuretano em teto e costado de tanques, e esferas desde que aplicado com formas removíveis para possibilitar a execução de barreira de vapor.</p> <p>NOTA 2 Para "Cold Box", só deve ser usado perlita expandida granular.</p> <p>NOTA 3 Admitido somente para os blocos de sustentação da chapa anular do fundo do tanque.</p> <p>NOTA 4 Para fins de definição de equipamentos de grande, médio e pequeno porte deve ser considerada a Tabela 3.</p> <p>NOTA 5 O projeto e a garantia de desempenho são responsabilidade do aplicador, que deve informar os valores de projeto (espessura, tipo e propriedades físicas) que são verificados na aceitação do procedimento de aplicação, conforme PETROBRAS N-896.</p>											

Tabela 3 - Classificação de Porte de Equipamento

Equipamento/Porte	Pequeno	Médio	Grande
Permutadores	$\leq 2 \text{ m}^3$	De 2 m^3 a 20 m^3	$> 20 \text{ m}^3$
Vasos	$\leq 2 \text{ m}^3$	De 2 m^3 a 20 m^3	$> 20 \text{ m}^3$
Torres	$\leq 5 \text{ m}^3$	De 5 m^3 a 40 m^3	$> 40 \text{ m}^3$

5 Condições Específicas

5.1 Conservação de Energia

5.1.1 Para a determinação da espessura econômica, deve ser feito um estudo específico que considere custos atualizados de energia e de instalação de isolamento térmico.

5.1.1.1 O roteiro de cálculo apresentado no Anexo A pode ser utilizado para determinação da espessura do isolamento. **[Prática Recomendada]**

5.1.1.2 O Anexo G pode ser empregado como um indicativo da espessura econômica, apenas no dimensionamento rápido de linhas ou equipamentos de pequeno porte isolados com poliuretano/poliisocianato e de acordo com as condições nele especificadas. **[Prática Recomendada]**

NOTA É responsabilidade do projetista verificar se os cálculos de custo de energia apresentados nesta Norma se aplicam ao seu caso específico ou se existem outros custos a serem considerados, tais como, perda de produção ou perda de eficiência de separação.

5.2 Controle de Condensação de Umidade na Superfície Externa do Isolamento Térmico

5.2.1 O isolamento térmico deve garantir, na superfície externa, uma temperatura acima do ponto de orvalho obtida da Tabela F.1 do Anexo F.

5.2.2 Para a determinação da espessura de controle da umidade, recomenda-se o uso do roteiro de cálculo do Anexo B. **[Prática Recomendada]**

5.3 Proteção ou Conforto Pessoal

5.3.1 O isolamento térmico deve garantir, na superfície externa, uma temperatura acima de 0°C .

5.3.2 O isolamento térmico deve ser feito em equipamentos ou tubulações em que as superfícies externas estejam localizadas a uma altura inferior a 2 m de qualquer piso ou a uma distância lateral inferior a 1 m de escadas ou plataformas destinadas ao trânsito de pessoal.

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

5.3.4 Para a determinação da espessura para proteção pessoal, deve ser feito um estudo específico que considere as condições ambientais locais.

5.3.5 O roteiro de cálculo apresentado no Anexo B pode ser utilizado para determinação da espessura do isolamento. **[Prática Recomendada]**

5.4 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. **[Prática Recomendada]**

Anexo A - Conservação de Energia - Roteiro de Cálculo

A.1 Introdução

A.1.1 O cálculo de espessura do isolamento térmico pelo conceito de conservação de energia visa, respeitadas as restrições de segurança e de processo, promover um benefício econômico com a redução do calor absorvido 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 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 térmico. Para tanto, é necessário calcular-se o calor absorvido para cada nova espessura analisada, o que requer um cálculo iterativo. O roteiro aqui apresentado é apenas uma das formas de determinação da espessura. A nomenclatura das variáveis utilizadas segue na Tabela E.1 do Anexo E.

A.2 Determinação do Fluxo de Calor

A.2.1 Definir uma configuração de espessura para início da análise, por exemplo, o valor imediatamente superior ao obtido de um outro critério de cálculo.

A.2.2 Estimar um valor para a temperatura da superfície externa do isolamento térmico, por exemplo, o mesmo valor obtido de um outro critério de cálculo.

A.2.3 Calcular os coeficientes de transferência de calor adequados ao problema, segundo o Anexo D.

A.2.4 Com a temperatura média $(T_e + T_0)/2$, calcular a condutividade térmica do material.

A.2.5 Calcular a nova temperatura da superfície externa através do balanço da equação do D.2.1.1 do Anexo D ou a equação do D.2.2 do Anexo D com:

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

NOTA 1 Para superfícies planas, pode ser expresso por:

$$T_e = \frac{(h_c + h_r) T_a + \frac{k}{L} T_0}{h_c + h_r + \frac{k}{L}}$$

NOTA 2 Para superfícies cilíndricas:

$$T_e = \frac{(h_c + h_r) T_a + \frac{k}{r_e \ln\left(\frac{r_e}{r_0}\right)} T_0}{h_c + h_r + \frac{k}{r_e \ln\left(\frac{r_e}{r_0}\right)}}$$

A.2.6 Se o valor de T_e diferir em mais de 2 °C do valor de T_e estabelecido anteriormente, retornar ao A.2.3 com o novo valor de T_e .

A.3 Determinação dos Custos

O cálculo do custo total de um sistema de isolamento térmico é composto por 5 parcelas, cada uma constituída pelo custo:

- a) da energia absorvida;
- b) da água de refrigeração;
- c) de investimento na unidade de refrigeração;
- d) de investimento no isolamento térmico;
- e) de manutenção do isolamento térmico.

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

A.3.1 Custo de Energia Absorvida

A.3.1.1 O custo anual de energia absorvida pode ser avaliado pela seguinte expressão:

$$CE = \frac{Q \cdot N \cdot C_{ac}}{1\,000 \cdot \eta_{co} \cdot COP}$$

A.3.1.2 Este custo, que se repete ao longo da vida do sistema de isolamento térmico, deve ser trazido para seu valor atual:

$$CE_{VA} = f(j, n) \cdot CE \quad (1)$$

$$f(j, n) = \frac{(1+j)^n - 1}{j \cdot (1+j)^n} \quad (2)$$

$$j = \frac{1+i}{1+\Delta} - 1 \quad (3)$$

A.3.2 Custo da Água de Refrigeração

A.3.2.1 O custo anual da água de refrigeração refere-se ao custo de reposição da água consumida no sistema de refrigeração e pode ser avaliado pela seguinte expressão:

$$CA = 3\,600 \cdot Q \cdot N \cdot W \cdot S$$

A.3.2.2 Este custo, que se repete ao longo da vida do isolamento térmico, deve ser trazido para seu valor atual:

$$CA_{VA} = f(j', n) \cdot CA \quad (1)$$

$$f(j', n) = \frac{(1+j')^n - 1}{j' \cdot (1+j')^n} \quad (2)$$

$$j' = \frac{1+i}{1+\Delta'} - 1 \quad (3)$$

A.3.3 Custo de Investimento na Unidade de Refrigeração

O custo de investimento na unidade de refrigeração é uma parcela que deve ser considerada quando um sistema de refrigeração tiver que ser instalado ou ampliado para atender a um aumento de demanda. Deve-se tomar cuidado especial para casos limites, como a mudança no custo unitário em função da capacidade total do sistema de refrigeração.

$$CR = Q \cdot R$$

A.3.4 Custo de Investimento no Isolamento Térmico

O custo de investimento no isolamento térmico, CI (\$/m², \$/m ou \$), deve considerar o material isolante térmico, os materiais de fixação e de proteção utilizados na instalação, bem como o custo com pessoal e equipamentos.

A.3.5 Custo de Manutenção do Isolamento Térmico

A.3.5.1 O custo de manutenção do isolamento térmico é usualmente considerado como um percentual do investimento no isolamento térmico.

$$CM = tm \cdot CI$$

A.3.5.2 Este custo, que se repete ao longo da vida do sistema de isolamento térmico, deve ser trazido para seu valor atual:

$$CM_{VA} = f(i, n) \cdot CM = f(i, n) \cdot tm \cdot CI \quad (1)$$

$$f(i, n) = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \quad (2)$$

A.3.6 Custo Total do Isolamento Térmico

O custo total do isolamento térmico deve ser dado por:

$$CT = CE_{VA} + CA_{VA} + CR + CI + CM_{VA}, \text{ ou}$$

$$CT = CE_{VA} + CA_{VA} + CR + CI \cdot [1 + tm \cdot f(i, n)]$$

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, o ganho de calor do ambiente, segundo o A.2, e o custo total associado, segundo o A.3, para então se fazer uma comparação entre as várias soluções analisadas.

A.4.2 Os parâmetros utilizados para a determinação dos custos, tais como custos da energia de acionamento e do isolamento térmico, devem se basear em valores históricos, para se procurar obter uma seleção válida para toda a vida do isolamento térmico. 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 térmico de um tanque, considerando-o como uma superfície plana de 10 m de comprimento. A temperatura interna é -25 °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 valores de referência de custos conforme Anexo G, porém considerando que se trata de uma instalação nova, onde o custo unitário da unidade de refrigeração é R\$ 1,8/W. De cálculo prévio para controle de condensação, foi determinado que a espessura mínima deve ser 38 mm de poliuretano, com uma temperatura de superfície de 18,4 °C e um fluxo de calor de 31,94 W/m². Considerar as condutividades térmicas do poliuretano injetado da PETROBRAS [N-1618](#).

Dados:

$$\begin{aligned}T_0 &= -25 \text{ °C} \\T_a &= 24 \text{ °C} \\L_c &= 10 \text{ m} \\V &= 2 \text{ m/s} \\\varepsilon &= 0,2\end{aligned}$$

A.5.1 Determinação do Fluxo de Calor (1ª Etapa)

Passo 1: A próxima espessura comercial é 51 mm.

Passo 2: T_e , est. = 20 °C.

Passo 3: $T_a = 24 \text{ °C}$ $\therefore \bar{T} = (T_e + T_a)/2 = 22 \text{ °C}$

propriedades do ar (ver Tabela D.3 do Anexo D):

$$k = 0,0258 \text{ W/m} \cdot \text{°C}$$

$$\nu = 15,44 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Pr = 0,708$$

coeficiente de transferência de calor por convecção:

do D.4.1 do Anexo D: $L_c = 10 \text{ m}$

$$Re = \frac{v \cdot L_c}{\nu} = 1,30 \cdot 10^6$$

$$\therefore h_c = \frac{k}{L_c} (0,037 Re^{0,8} - 871) Pr^{0,33} = 4,58 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

coeficiente de transferência de calor por radiação:

do D.1 do Anexo D:

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

$$\therefore h_r = 1,17 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Passo 4: $\bar{T} = (T_0 + T_e)/2 = -5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ da N-1618: $k = 0,0279\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$

$$\text{Passo 5: } T_e = \frac{(h_c + h_r) T_a + \frac{k}{L} T_0}{h_c + h_r + \frac{k}{L}} \quad T_e = 19,7\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Passo 6: A diferença em relação ao valor anterior de T_e é inferior a $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, portanto não é necessário voltar ao passo 3. O fluxo de calor absorvido pode ser calculado por:

$$q = (h_c + h_r) \cdot (T_a - T_e) = 24,72\text{ W/m}^2$$

A.5.2 Determinação dos Custos (2ª Etapa)

Repetindo-se o procedimento acima para outras espessuras e utilizando-se as equações do A.3 para o cálculo dos custos, com os valores de referência de custos do Anexo G, obtêm-se os dados da Tabela A.1.

Tabela A.1 - Exemplo de Cálculo - Resumo

Espessura (mm)	Fluxo de calor (W/m^2)	Custo atualizado da energia ($\text{R\$/m}^2$)	Custo de invest. na unidade de refrigeração ($\text{R\$/m}^2$)	Custo atualizado da água de refrigeração ($\text{R\$/m}^2$)	Custo de invest. e de manutenção ($\text{R\$/m}^2$)	Custo total ($\text{R\$/m}^2$)
38	31,94	140,29	57,49	0,14	367,86	565,78
51	24,72	107,47	44,50	0,11	374,74	526,82
63	20,12	88,39	36,22	0,09	391,94	516,64
76	16,88	74,12	30,38	0,08	404,03	508,61
89	14,53	63,83	26,15	0,06	415,56	505,60
102	12,76	56,04	22,96	0,06	427,08	506,14

NOTA Logo, a espessura econômica é 89 mm. Porém, o ganho no custo total em relação à espessura de 76 e mesmo à de 63 mm não são muito significativas, portanto estas espessuras devem ser também consideradas na decisão.

Anexo B - Controle de Condensação de Umidade na Superfície Externa do Isolamento Térmico e Proteção Pessoal - Roteiro de Cálculo**B.1 Introdução**

O cálculo de espessura do isolamento térmico pelos conceitos de controle de condensação de umidade e de proteção pessoal pressupõe a existência de uma temperatura mínima admissível na superfície externa do isolamento térmico. Esse dimensionamento requer um cálculo iterativo e o roteiro aqui apresentado é apenas uma das formas de determinação das espessuras. A nomenclatura das variáveis utilizadas segue na Tabela E.1 do Anexo E.

B.2 Superfícies Planas

B.2.1 Com a temperatura mínima especificada, calcular os coeficientes de transferência de calor adequados ao problema, segundo o Anexo D.

B.2.2 Calcular o fluxo de calor:

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

B.2.3 Determinação da espessura:

- a) com a temperatura média $(T_0 + T_e)/2$, calcular a condutividade térmica do material;
- b) calcular a espessura de isolamento térmico através da equação do D.2.1.1 do Anexo D;
- c) adotar espessura comercial imediatamente superior à calculada.

B.3 Superfícies Cilíndricas ou Esféricas

O cálculo para superfícies cilíndricas ou esféricas requer uma iteração a mais, pois o diâmetro externo, que depende das espessuras, influencia o cálculo do fluxo de calor.

B.3.1 Estimar o valor do diâmetro externo do isolamento térmico, por experiência prévia ou pelas aproximações:

- a) $D_e = 1,5 D_0$ para $D_0 \leq 150$ mm;
- b) $D_e = 1,3 D_0$ para $150 < D_0 \leq 300$ mm;
- c) $D_e = 1,1 D_0$ para $D_0 > 300$ mm.

B.3.2 Com a temperatura mínima especificada, calcular os coeficientes de transferência de calor adequados ao problema, segundo Anexo D.

B.3.3 Calcular o fluxo de calor referente à superfície externa do isolamento térmico:

$$q_e = (h_c + h_r) \cdot (T_a - T_e)$$

B.3.4 Determinação da espessura:

- a) com a temperatura média $(T_0 + T_e)/2$, calcular a condutividade térmica do material;
- b) para superfícies cilíndricas, calcular o diâmetro externo do isolamento térmico através da equação do D.2.2 do Anexo D, considerando, no lado esquerdo da equação, o produto $q_e \cdot D_e/2$; para superfícies esféricas, calcular o diâmetro externo do isolamento térmico através da equação do D.2.3.1 do Anexo D, considerando, no lado esquerdo da equação, o produto $q_e \cdot D_e^2 / 4$;
- c) adotar espessura comercial imediatamente superior à calculada.

B.3.5 Calcular o novo valor de D_e , se esse valor diferir em mais de 5 % do estabelecido anteriormente, retornar ao B.3.2 com o novo valor de D_e .

B.4 Exemplo de Cálculo

Dimensionar o isolamento térmico de uma tubulação de 6" ($D_0 = 0,168$ m) para uma temperatura mínima na superfície externa de 12 °C. A temperatura interna é -30 °C e a ambiente é 24 °C. Assume-se emissividade 0,2 para o alumínio e ausência de vento (convecção natural). Deve ser usado poliuretano expandido, com as seguintes condutividades térmicas:

- a) 0,0273 W/m .°C @ -32 °C;
- b) 0,0259 W/m .°C @ -18 °C;
- c) 0,0237 W/m .°C @ 10 °C.

Dados:

$T_0 = -30$ °C
 $T_e = 12$ °C
 $T_a = 24$ °C
 $D_0 = 0,168$ m
 $E = 0,2$

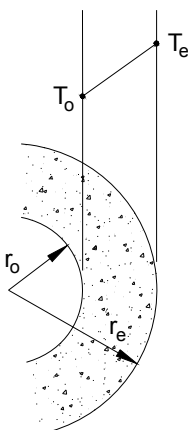


Figura B.1 - Isolamento Térmico de Uma Tubulação

Passo 1: $D_e = 0,218 \text{ m}$ (estimado)

$$\text{Passo 2: } T_f = \frac{T_e + T_a}{2} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = T_a - T_e = 12 \text{ }^\circ\text{C}$$

propriedades do ar (ver Tabela D.3 do Anexo D):

$$\Psi = 106,74 \cdot 10^6 \text{ 1/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$k = 0,0256 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

coeficiente de transferência de calor por convecção:

$$\text{do D.3 do Anexo D: } L_c = D_e = 0,218 \text{ m}$$

$$Ra = L_c^3 \cdot \Psi \cdot \Delta t = 1,33 \cdot 10^7$$

$$\therefore h_c = \frac{k}{L_c} \left(0,60 + 0,3213 \cdot Ra^{0,167} \right)^2 = 3,61 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

coeficiente de transferência de calor por radiação:

do D.1 do Anexo D:

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

$$\therefore h_r = 1,12 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\text{Passo 3: } q_e = (h_c + h_r) \Delta t = 56,7 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Passo 4: Da equação do D.2.2 do Anexo D: } q_e \frac{D_e}{2} = \frac{k (T_2 + T_1)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}$$

Onde:

$$T_1 = T_0 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_e = 12 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\bar{T} = (T_1 + T_2) / 2 = -9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$k = 0,0252 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$D_1 = D_0 = 0,168 \text{ m}$$

$$D_2 = D_e, \text{ a calcular:}$$

$$56,7 \cdot \frac{D_e}{2} = \frac{0,0252 \cdot [12 - (-30)]}{\ln\left(\frac{D_e}{0,168}\right)}$$

Resolvendo, obtém-se:

$$D_e = 0,202 \text{ m}$$

$$\therefore L = (D_e - D_0) / 2 = 0,017 \text{ m}$$

NOTA A espessura comercial imediatamente superior é 25 mm.

Passo 5: Com a espessura de 25 mm, o novo D_e é 0,218 m, portanto não é necessário voltar ao passo 2.

Anexo C - Estabilização de Fases de Processos Industriais - Roteiro de Cálculo

C.1 Introdução

O cálculo de espessura do isolamento térmico pelo conceito de estabilização de fases pressupõe a existência de um fluxo de calor máximo admissível através da parede da tubulação ou do equipamento. Esse dimensionamento requer um cálculo iterativo e o roteiro aqui apresentado é apenas uma das formas de determinação das espessuras. A nomenclatura das variáveis utilizadas segue na Tabela E.1 do Anexo E.

C.2 Superfícies Planas

C.2.1 Estabelecer um valor inicial para a temperatura da superfície, por exemplo:

$$T_a - T_e = 0,10 \cdot (T_a - T_0)$$

C.2.2 Calcular os coeficientes de transferência de calor adequados ao problema, segundo Anexo D.

C.2.3 Calcular a nova temperatura da superfície externa através da fórmula:

$$T_e = T_a - \frac{q_{\text{máx}, e}}{h_c + h_r}$$

C.2.4 Se o novo valor de T_e diferir em mais de 2 °C do estabelecido anteriormente, retornar ao C.2.2 com o novo valor de T_e .

C.2.5 Determinação da espessura:

- a) com a temperatura média $(T_0 + T_e)/2$, calcular a condutividade térmica do material;
- b) calcular a espessura de isolamento térmico através da equação do D.2.1.1 do Anexo D;
- c) adotar espessura comercial imediatamente superior à calculada.

C.3 Superfícies Cilíndricas ou Esféricas

O cálculo para superfícies cilíndricas ou esféricas requer uma iteração a mais, pois o diâmetro externo, que depende das espessuras, influencia o cálculo da temperatura da superfície externa. Assume-se aqui que o fluxo de calor máximo admissível refere-se à superfície externa da tubulação ou do equipamento, ou seja, ao diâmetro D_0 .

C.3.1 Estimar o valor do diâmetro externo do isolamento térmico, por experiência prévia ou pelas aproximações:

- a) $D_e = 1,5 D_0$ para $D_0 \leq 150$ mm;
- b) $D_e = 1,3 D_0$ para $150 < D_0 \leq 300$ mm;
- c) $D_e = 1,1 D_0$ para $D_0 > 300$ mm.

C.3.2 Estabelecer um valor inicial para a temperatura da superfície, por exemplo:

$$T_a - T_e = 0,10 \cdot (T_a - T_0)$$

C.3.3 Calcular os coeficientes de transferência de calor adequados ao problema, segundo Anexo D.

C.3.4 Calcular a nova temperatura da superfície externa através da fórmula:

$$T_e = T_a - \frac{q_{\text{máx},e}}{h_c + h_r} \begin{cases} q_{\text{máx},e} = q_{\text{máx},0} \frac{D_0}{D_e}, \text{ para superfícies cilíndricas} \\ q_{\text{máx},e} = q_{\text{máx},0} \left(\frac{D_0}{D_e} \right)^2, \text{ para superfícies esféricas} \end{cases}$$

C.3.5 Se o novo valor de T_e diferir em mais de 2 °C do estabelecido anteriormente, retornar ao C.3.3 com o novo valor de T_e .

C.3.6 Determinação da espessura:

- com a temperatura média $(T_0 + T_e)/2$, calcular a condutividade térmica do material;
- para superfícies cilíndricas, calcular o diâmetro externo do isolamento térmico através da equação do D.2.2 do Anexo D, considerando, no lado esquerdo da equação, o produto $q_{\text{máx},0} \cdot D_0/2$; para superfícies esféricas, calcular o diâmetro externo do isolamento térmico através da equação do D.2.3.1 do Anexo D, considerando, no lado esquerdo da equação, o produto $q_{\text{máx},0} \cdot D_0^2/4$;
- adotar espessura comercial imediatamente superior à calculada.

C.3.7 Calcular o novo valor de D_e , se esse valor diferir em mais de 5 % do estabelecido anteriormente, retornar ao C.3.2 com o novo valor de D_e .

C.4 Exemplo de Cálculo

Dimensionar o isolamento térmico de uma tubulação de 6" ($D_0 = 0,168$ m) para um fluxo de calor máximo na superfície externa do tubo de 100 W/m². A temperatura interna é -40 °C e a ambiente é 24 °C. Assume-se emissividade 0,2 para o alumínio e ventos de 2 m/s (convecção forçada). Deve ser usado poliuretano expandido, com as seguintes condutividades térmicas:

- 0,0273 W/m .°C @ -32 °C;
- 0,0259 W/m .°C @ -18 °C;
- 0,0237 W/m .°C @ 10 °C.

Dados:

- T_0 = -40 °C
 T_a = 24 °C
 $q_{\text{máx},0}$ = 100 W/m²
 D_0 = 0,168 m
 V = 2 m/s
 E = 0,2

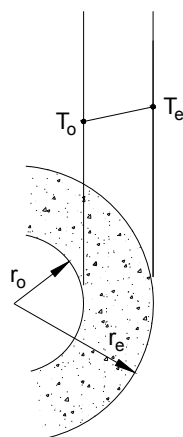


Figura C.1 - Isolamento Térmico de Uma Tubulação

Passo 1: $D_e = 0,218$ m (estimado)

Passo 2: $T_e \cong T_a - 0,10(T_a - T_o) = 17,6$ °C $\therefore T_{e, \text{est}} = 18$ °C

Passo 3: $T_a = 24$ °C

propriedades do ar (ver Tabela D.3 do Anexo D):

$$k = 0,0261 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\nu = 15,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Pr} = 0,708$$

coeficiente de transferência de calor por convecção (independe de T_e):

do D.4.2 do Anexo D:

$$L_c = D_e = 0,218 \text{ m}$$

$$\text{Re} = \frac{\nu \cdot L_c}{\nu} = 27\,884$$

$$\therefore h_c = 0,26 \frac{k}{L_c} \text{Re}^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,37} = 12,72 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

coeficiente de transferência de calor por radiação (depende de T_e):

do D.1 do Anexo D:

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

Passos 4 e 5: Cálculo da temperatura da superfície externa:

$$T_e = T_a - \frac{q_{\text{máx}, o} \cdot \left(\frac{D_0}{D_e} \right)}{h_c + h_r}$$

o cálculo de T_e é iterativo, pois h_r depende de T_e :

T_e estimado	h_r	$h_r + h_c$	T_e calculado
18	1,15	13,87	18,4
18,4	1,15	13,87	18,4

$$\therefore T_e = 18,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Passo 6: Da equação do D.2.2 do Anexo D: $q_{\text{máx}, o} \frac{D_o}{2} = \frac{k (T_2 - T_1)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}$

$$\begin{aligned} T_1 &= T_0 = -40 \text{ } ^\circ\text{C} \\ T_2 &= T_e = 18,4 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \bar{T} &= (T_1 + T_2) / 2 = -10,8 \text{ } ^\circ\text{C} \\ k &= 0,0253 \text{ W/m } ^\circ\text{C} \\ D_1 &= D_0 = 0,168 \text{ m} \\ D_2 &= D_e, \text{ a calcular:} \end{aligned}$$

$$100 \cdot \frac{0,168}{2} = \frac{0,0253 \cdot [18,4 - (-40)]}{\ln \left(\frac{D_e}{0,168} \right)}$$

$$\therefore D_e = 0,200 \text{ m}$$

$$\therefore L = (D_e - D_0) / 2 = 0,016 \text{ m}$$

NOTA A espessura comercial imediatamente superior é 25 mm.

Passo 7: Com a espessura de 25 mm, o novo D_e é 0,218 m, portanto não é necessário voltar ao passo 2.

Anexo D - Equações de Transferência de Calor

D.1 Radiação

D.1.1 O fluxo de calor resultante da transferência de calor por radiação entre uma superfície e o ambiente é calculado pela equação:

$$q_r = 5,669 \cdot 10^{-8} \varepsilon \left[(T_a + 273)^4 - (T_e + 273)^4 \right]$$

D.1.2 É conveniente escrever a equação do D.1.1 da seguinte forma:

$$q_r = h_r (T_a - T_e)$$

D.1.3 Se define o coeficiente de transferência de calor por radiação:

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

D.1.4 Valores típicos de emissividade de superfícies são apresentados na Tabela D.4.

D.2 Condução

A condutividade térmica de cada material deve ser obtida em normas específicas ou, na ausência delas, da literatura. Assumindo-se uma dependência linear da condutividade com a temperatura, deve ser utilizada a média aritmética das temperaturas às quais o material está submetido.

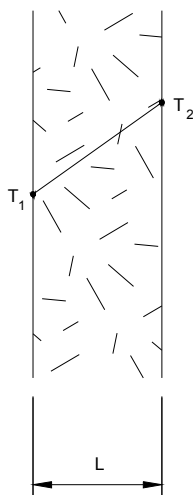


Figura D.1 - Isolamento Térmico Simples em Superfície Plana

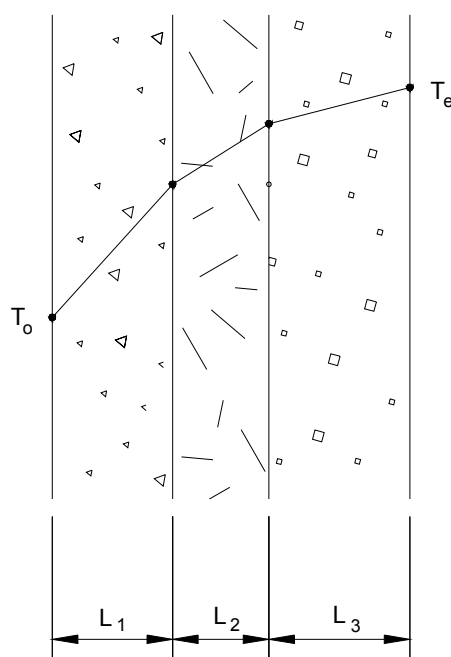


Figura D.2 - Isolamento Térmico em Parede de 3 Camadas em Superfície Plana

D.2.1 Superfícies Planas

D.2.1.1 Para uma parede de um único material, como a representada na Figura D.1, o fluxo de calor por condução é dado por:

$$q_k = \frac{k}{L} (T_2 - T_1)$$

D.2.1.2 Para um caso mais geral, como o representado na Figura D.2, de uma parede de 3 camadas, pode-se escrever:

$$q_k = \frac{T_e - T_0}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3}}$$

D.2.2 Superfícies Cilíndricas

Para uma parede de um único material, como a representada na Figura D.3, o fluxo de calor por condução é dado por:

$$q_{k_1} r_1 = q_{k_2} r_2 = \frac{k(T_2 - T_1)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}$$

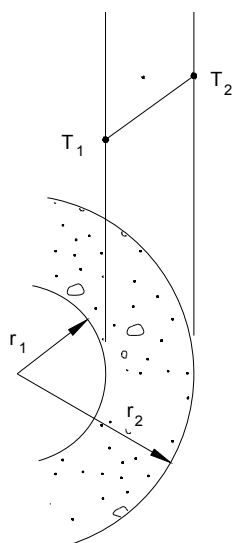


Figura D.3 - Isolamento Térmico Simples em Superfície Cilíndrica

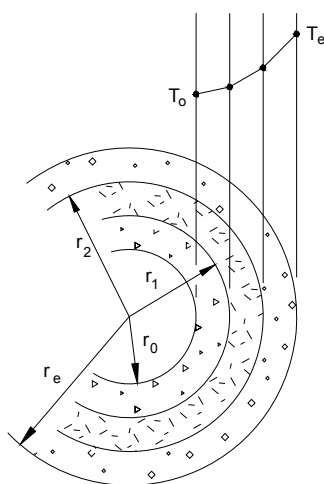


Figura D.4 - Isolamento Térmico de Parede de 3 Camadas em Superfície Cilíndrica

NOTA Para um caso mais geral, de uma parede de 3 camadas, pode-se escrever:

$$q_{k_i} r_i = \frac{(T_e - T_o)}{\frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)}{k_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_2}\right)}{k_3}}$$

D.2.3 Superfícies Esféricas

D.2.3.1 Para uma parede de um único material, análoga à cilíndrica representada acima o fluxo de calor por condução é dado por:

$$q_{k_1} r_1^2 = q_{k_2} r_2^2 = \frac{k(T_2 - T_1)}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}$$

D.2.3.2 Para casos mais gerais, de uma parede de 3 camadas, pode-se escrever:

$$q_{k_i} r_i^2 = \frac{(T_e - T_o)}{\frac{\left(\frac{1}{r_o} - \frac{1}{r_1}\right)}{k_1} + \frac{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{k_2} + \frac{\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_e}\right)}{k_3}}$$

D.3 Convecção Natural

D.3.1 O fluxo de calor por convecção natural (ar parado) pode ser expresso por:

$$q_c = h_c (T_a - T_e)$$

NOTA O coeficiente de transferência de calor é obtido de expressões apropriadas, que levam em conta a forma e a orientação da superfície, bem como as propriedades do ar. As correlações aqui adotadas para o coeficiente de transferência de calor foram extraídas do livro "Fundamentals of Heat Transfer", de F. P. Incropera e D. P. Dewitt.

D.3.2 Essas correlações, apresentadas na Tabela D.1, têm faixas de validades, determinadas pelo número adimensional Rayleigh, expresso por:

$$Ra = \psi \cdot L^3 \cdot \Delta t$$

Onde:

$$\psi = \frac{\rho^2 \cdot \beta \cdot C_p \cdot g}{\mu \cdot k}$$

$$\Delta t = T_a - T_e$$

Tabela D.1 - Correlações Para Convecção Natural

Superfície	Dimensão característica L_c	Correlação para coeficiente de transferência de calor por convecção natural
Plana Vertical	altura da superfície	$h_c = 0,59 k \left(\frac{\Psi \Delta t}{L_c} \right)^{0,25}, \text{ para } 10^4 < Ra < 10^9$ $h_c = 0,10 k (\Psi \Delta t)^{0,33}, \text{ para } 10^9 < Ra < 10^{13}$
Cilíndrica Vertical	altura da superfície	as mesmas de superfície plana vertical, se $D_e \geq \frac{35 \cdot L_c}{\left(\frac{Ra}{Pr} \right)^{0,25}}$
Plana Horizontal, Face Fria Voltada para Baixo	$\frac{\text{área}}{\text{perímetro}}$	$h_c = 0,54 k \left(\frac{\Psi \Delta t}{L_c} \right)^{0,25}, \text{ para } 10^5 < Ra < 10^7$ $h_c = 0,15 k (\Psi \Delta t)^{0,33}, \text{ para } 10^7 < Ra < 10^{10}$
Plana Horizontal, Face Fria Voltada para Cima	$\frac{\text{área}}{\text{perímetro}}$	$h_c = 0,27 k \left(\frac{\Psi \Delta t}{L_c} \right)^{0,25}, \text{ para } 10^5 < Ra < 10^{10}$
Cilíndrica Horizontal	diâmetro externo	$h_c = \frac{k}{L_{c-5}} \left(0,60 + 0,3213 \cdot Ra^{0,167} \right)^2,$ para $10^5 < Ra < 10^{12}$
Esférica	diâmetro externo	$h_c = \frac{k}{L_c} \left(2 + 0,43 \cdot Ra^{0,25} \right), \text{ para } 1 < Ra < 10^5$

D.3.3 O uso das equações fora das faixas, embora muitas vezes necessário, pode levar a resultados imprecisos.

D.3.4 A dimensão L_c é uma característica de cada superfície, dependendo de sua forma e orientação. O parâmetro ψ está tabelado, junto com outras propriedades do ar, na Tabela D.3 e deve ser calculado a uma temperatura média definida por:

$$T_f = \frac{T_e + T_a}{2}$$

D.4 Convecção Forçada

D.4.1 O fluxo de calor por convecção forçada (vento) pode ser expresso por:

$$q_c = h_c (T_a - T_e)$$

NOTA O coeficiente de transferência de calor é obtido de expressões apropriadas, que levam em conta a forma da superfície, a velocidade do vento e as propriedades do ar. As correlações aqui adotadas para o coeficiente de transferência de calor foram extraídas do livro "Fundamentals of Heat Transfer", de F. P. Incropera e D. P. Dewitt.

D.4.2 Essas correlações aqui adotadas têm faixas de validade, determinadas pelo número adimensional Reynolds, Re , expresso por:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L_c}{\mu} = \frac{v \cdot L_c}{\nu}$$

D.4.3 O uso das equações fora das faixas, embora muitas vezes necessário, pode levar a resultados imprecisos.

D.4.4 A dimensão L_c é o comprimento da superfície plana na direção do vento ou o diâmetro da superfície cilíndrica ou esférica. A viscosidade cinemática ν está tabelada, junto com outras propriedades do ar, na Tabela D.3.

D.4.5 Superfície Plana

$$h_c = 0,664 \frac{k}{L_c} Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}, \text{ para } Re < 5 \cdot 10^5 \quad (1)$$

$$h_c = \frac{k}{L_c} (0,037 \cdot Re^{0,8} - 871) Pr^{0,33}, \text{ para } 5 \cdot 10^5 < Re < 10^8 \quad (2)$$

Onde:

Re e Pr, devem ser calculados a uma temperatura média $(T_e + T_a)/2$.

D.4.6 Superfície Cilíndrica

$$h_c = C \frac{k}{L_c} Re^m \cdot Pr^{0,37}, \text{ para } 40 < Re < 10^6$$

Onde:

Re e Pr devem ser calculados à temperatura ambiente e os valores de “C” e “m” são obtidos da Tabela D.2, em função do valor de Re.

Tabela D.2 - Parâmetros “C” e “M”

Re	C	m
40 a 1 000	0,51	0,5
1 000 a $2 \cdot 10^5$	0,26	0,6
$2 \cdot 10^5$ a 10^6	0,076	0,7

D.4.7 Superfície Esférica

$$h_c = \frac{k}{L_c} \left[2 + (0,4 \cdot Re^{0,50} + 0,06 \cdot Re^{0,67}) \cdot Pr^{0,4} \right], \text{ para } 3,5 < Re < 7,6 \cdot 10^4$$

Onde:

Re e Pr, devem ser calculados à temperatura ambiente.

D.5 Propriedades Físicas**Tabela D.3 - Propriedades do Ar**

Temperatura (°C)	Condutividade térmica k (W/m . °C)	Ψ (1/m³ . °C)	Viscosidade cinemática U (m²/s)	Número de prandtl Pr
-30	0,0217	249,7 · 10 ⁶	10,9 · 10 ⁻⁶	0,722
-20	0,0226	204,3 · 10 ⁶	11,7 · 10 ⁻⁶	0,719
-10	0,0234	172,1 · 10 ⁶	12,6 · 10 ⁻⁶	0,717
0	0,0242	145,0 · 10 ⁶	13,5 · 10 ⁻⁶	0,714
10	0,0250	122,1 · 10 ⁶	14,4 · 10 ⁻⁶	0,711
20	0,0257	102,9 · 10 ⁶	15,3 · 10 ⁻⁶	0,709
30	0,0264	87,4 · 10 ⁶	16,2 · 10 ⁻⁶	0,707
40	0,0272	75,8 · 10 ⁶	17,2 · 10 ⁻⁶	0,705
50	0,0280	65,7 · 10 ⁶	18,2 · 10 ⁻⁶	0,704

Tabela D.4 - Emissividades Típicas de Superfícies

Material	ε
Chapa de alumínio	0,1 a 0,2
Tinta preta fosca	0,96 a 0,98
Tinta a base de alumínio	0,3 a 0,7
Chapa de aço	0,94 a 0,97
Tinta branca	0,84 a 0,92
Massa asfáltica	0,93

NOTA A nomenclatura das variáveis utilizadas segue na Tabela E.1 do Anexo E.

Anexo E - Nomenclatura
Tabela E.1 - Nomenclatura

Variável	Descrição	Unidade
C_p	calor específico	J/kg . °C
C_{ac}	custo da energia de acionamento do compressor	\$/kWh
CA, CA_{VA}	custo anual da água de refrigeração e custo atualizado da água de refrigeração	\$/ano.m ² , \$/ano.m ou \$/ano
CE, CE_{VA}	custo anual de energia absorvida e custo atualizado da energia absorvida	\$/ano.m ² , \$/ano.m ou \$/ano
CI	custo de investimento do isolamento térmico	\$/ano.m ² , \$/ano.m ou \$/ano
CM, CM_{VA}	custo de manutenção do isolamento térmico e custo atualizado de manutenção do isolamento térmico	\$/ano.m ² , \$/ano.m ou \$/ano
COP	coeficiente de performance da unidade de refrigeração	-
CR	custo de investimento na unidade de refrigeração	\$/ano.m ² , \$/ano.m ou \$/ano
CT	custo total	\$/ano.m ² , \$/ano.m ou \$/ano
D_e	diâmetro da superfície externa do isolamento térmico	m
D_0	diâmetro da superfície externa do equipamento ou tubulação (interna do isolamento térmico)	m
$f(i,n), f(j,n)$ e $f(j',n)$	fatores de atualização	-
H	profundidade	m
h_c	coeficiente de transferência de calor por convecção	W/m ² . °C
h_r	coeficiente de transferência de calor por radiação	W/m ² . °C
i	taxa de atratividade anual	%
k_1, k_2, \dots	condutividade térmica dos materiais 1, 2, ...	W/m . °C
L_1, L_2, \dots	espessura dos materiais 1, 2, ...	m
L_c	dimensão característica	m
L_t	comprimento da tubulação	m
n	vida do isolamento térmico	ano
N	número de horas de operação por ano	h/ano
Pr	número de Prandtl	-
Q	quantidade de calor por unidade de tempo	W/m ² , W/m ou W
q_c	fluxo de calor por convecção	W/m ²
q_k	fluxo de calor por condução	W/m ²

Tabela E.1 - Nomenclatura (Continuação)

Variável	Descrição	Unidade
$q_{\text{máx, e}}$	fluxo de calor máximo admissível na superfície externa do isolamento térmico	W/m^2
$q_{\text{máx, o}}$	fluxo de calor máximo admissível na superfície externa do tubo	W/m^2
q_r	fluxo de calor por radiação	W/m^2
R	custo unitário da unidade de refrigeração	$\$/\text{W}$
r_1, r_2	raio das faces de uma parede de material isolante térmico	m
Ra	número de Rayleigh	-
Re	número de Reynolds	-
r_e	raio da superfície externa do isolamento térmico	m
r_0	raio da superfície externa do equipamento ou tubulação (interna do isolamento térmico)	m
S	consumo de água de refrigeração	m^3/J
T_1, T_2	temperatura das faces de uma parede de material isolante térmico	$^{\circ}\text{C}$
T_a	temperatura ambiente	$^{\circ}\text{C}$
T_e	temperatura da superfície externa do isolamento térmico	$^{\circ}\text{C}$
T_0	temperatura da superfície externa do equipamento ou tubulação (interna do isolamento térmico)	$^{\circ}\text{C}$
tm	percentual do custo de manutenção em relação ao investimento	-
v	velocidade	m/s
W	custo da água de refrigeração	$\$/\text{m}^3$
Δ	taxa de crescimento diferenciado do custo da energia	-
Δ'	taxa de crescimento diferenciado do custo da água de refrigeração	-
ε	emissividade da superfície	-
η_{co}	eficiência do compressor	-
μ	viscosidade dinâmica	kg/m.s
ν	viscosidade cinemática	m^2/s
ρ	massa específica	kg/m^3
Ψ	parâmetro de propriedades do ar	$\text{m}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
g	constante gravitacional	m/s^2
β	coeficiente de expansão térmica do fluido	$^{\circ}\text{C}^{-1}$
q_e	fluxo de calor na superfície externa do isolamento térmico	W/m^2

Anexo F - Ponto
Tabela F.1 - Ponto de Orvalho

Temperatura ambiente (°C)	Umidade relativa (%)																		
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
-15	-37	-34	-32	-29	-27	-26	-24	-23	-22	-21	-20	-20	-19	-18	-17	-17	-16	-15	-15
-12	-35	-32	-29	-27	-25	-23	-22	-21	-19	-19	-18	-17	-16	-15	-15	-14	-13	-13	-12
-9	-33	-29	-27	-25	-22	-21	-19	-18	-17	-16	-15	-14	-13	-13	-12	-11	-10	-10	-9
-7	-31	-27	-24	-22	-20	-19	-17	-16	-14	-13	-12	-11	-10	-10	-9	-9	-8	-7	-7
-4	-29	-26	-22	-20	-18	-16	-14	-13	-12	-11	-9	-9	-8	-7	-7	-6	-5	-4	-4
-1	-26	-23	-20	-17	-15	-13	-12	-11	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-4	-3	-2	-2	-1
2	-24	-21	-17	-15	-13	-11	-9	-8	-7	-6	-5	-3	-3	-2	-1	0	1	1	2
4	-22	-18	-15	-13	-10	-9	-7	-6	-4	-3	-2	-2	-1	1	2	2	3	4	4
7	-20	-16	-13	-11	-8	-7	-5	-4	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	7
10	-18	-14	-11	-8	-6	-4	-3	-1	0	1	3	4	5	6	7	7	8	9	10
13	-16	-12	-9	-6	-4	-2	0	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
16	-14	-10	-7	-4	-2	0	2	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
18	-12	-8	-5	-2	1	3	4	6	8	9	11	12	13	14	15	16	17	17	18
21	-10	-6	-2	1	3	5	7	9	10	12	13	14	16	17	18	18	19	20	21
24	-8	-4	0	3	6	8	9	11	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24
27	-6	-2	2	5	8	10	12	14	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	27
29	-5	0	4	7	10	12	14	16	18	19	21	22	23	24	25	26	27	28	29
32	-3	2	7	9	12	14	17	19	21	22	23	25	26	27	28	29	30	31	32
35	-1	4	9	12	15	17	19	21	23	24	26	28	29	30	31	32	33	34	35
38	1	7	11	14	17	20	22	24	26	27	29	30	31	33	33	34	35	36	38
41	3	9	13	17	19	22	24	26	28	29	31	32	34	35	36	37	38	39	41
43	5	11	16	19	22	25	27	29	31	32	33	35	37	38	39	40	41	42	43
46	7	13	18	21	24	27	29	31	33	34	36	38	39	41	42	43	44	45	46
49	8	15	20	23	26	29	31	33	35	37	39	41	42	43	44	45	47	48	49
52	11	17	22	25	29	32	34	36	38	40	42	43	44	45	47	48	49	51	52

Anexo G - Conservação de Energia - Espessuras Recomendadas

G.1 A Tabela G.1 apresenta as espessuras recomendadas para sistemas de isolamento térmico utilizando poliuretano e poliisocianurato pré-moldados e poliuretano injetado, segundo o critério de conservação de energia. Foram considerados os seguintes parâmetros:

- a) temperatura ambiente: 25 °C;
- b) velocidade do vento: 10 km/h;
- c) emissividade da superfície: 0,20;
- d) valor de referência do custo do isolamento térmico: conforme Tabela G.2;
- e) custo da energia de acionamento: R\$ 0,173/kWh (referência: MAIO/2010);
- f) custo da água de refrigeração: R\$ 0,043 /m³ (referência: MAI/09);
- g) custo da unidade de refrigeração: não é considerado para unidades existentes;
- h) eficiência do compressor: 95 %;
- i) coeficiente de performance: 2;
- j) consumo da água de refrigeração: $9,0 \cdot 10^{-10}$ m³/J;
- k) taxa de atratividade: 15 %;
- l) taxa de crescimento diferenciado do custo da energia: 0 %;
- m) taxa de crescimento diferenciado do custo da água de resfriamento: 0 %;
- n) vida do sistema de isolamento térmico: 15 anos;
- o) horas de operação: 8 250 h/ano;
- p) custo de manutenção: 2 % do custo do isolamento térmico, por ano.

G.2 Para condições diferentes das apresentadas acima, a Tabela G.1 pode ser empregada como um indicativo da espessura econômica, apenas no dimensionamento rápido de linhas ou equipamentos de pequeno porte. **[Prática Recomendada]**

G.3 Para sistemas maiores deve ser feito um cálculo específico, conforme o 5.1.

Tabela G.1 - Espessuras Econômicas, em mm, para Isolamento Térmico à Base de Poliuretano e Poliisocianurato Pré-Moldados e Poliuretano Injetado

Diâmetro (pol)	Temperatura (°C)												
	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
1/2													
3/4													
1													
1 1/2													
2													
2 1/2													
3													
4													
6													
8													
10													
12													
14													
16													
18													
20													
22													
24													
26													
28													
30													
32													
34													
36													
42													
49													
54													
60													
Plano													

NOTA 1 Ver 5.1.1 e 5.1.2.
 NOTA 2 Para diâmetros acima de 60", considerar superfície plana.
 NOTA 3 Exemplo de utilização: para uma linha de 8" operando a - 25 °C, a espessura econômica é 38 mm.
 NOTA 4 A Tabela G.1 contempla somente o critério de conservação de energia.

Tabela G.2 - Valores de Referência do Custo do Isolamento Térmico à Base de Poliuretano e Poliisocianurato Pré-Moldados e Poliuretano Injetado

Diâmetro (pol)	Espessura (mm)										
	25	38	51	63	76	89	102	114	126	140	153
1/2	42,90	58,29	77,73	87,82	109,25	131,47	151,07	171,79	190,49	212,03	227,08
3/4	47,90	63,59	83,53	93,45	115,31	137,91	157,69	178,65	197,47	219,13	234,11
1	54,11	70,18	90,74	100,43	122,83	145,90	165,90	187,16	206,14	227,93	242,84
1 1/4	62,26	78,83	100,20	109,59	132,71	156,38	176,68	198,33	217,52	239,50	254,30
1 1/2	67,91	84,83	106,76	115,95	139,56	163,66	184,15	206,08	225,41	247,52	262,25
2	79,03	96,62	119,66	128,45	153,03	177,96	198,86	221,31	240,93	263,29	277,89
2 1/2	90,80	109,10	133,31	141,68	167,29	193,10	214,42	237,44	257,35	279,99	294,43
3	105,53	124,73	150,40	158,24	185,15	212,05	233,90	257,63	277,91	300,89	315,15
4	129,06	149,70	177,71	184,70	213,66	242,32	265,02	289,88	310,76	334,28	348,24
5	154,07	176,24	206,74	212,83	243,98	274,51	298,10	324,16	345,68	369,77	383,41
6	179,09	202,78	235,77	240,96	274,29	306,69	331,18	358,44	380,59	405,26	418,59
8	226,16	252,71	290,38	293,88	331,33	367,24	393,43	422,94	446,29	472,04	484,77
10	276,09	305,69	348,33	350,03	391,85	431,49	459,47	491,38	515,99	542,89	554,99
12	323,16	355,62	402,94	402,95	448,88	492,04	521,71	555,88	581,69	609,66	621,17
14	352,62	386,88	437,13	436,08	484,59	529,94	560,67	596,26	622,81	651,47	662,60
16	399,69	436,81	491,74	489,00	541,63	590,50	622,91	660,76	688,51	718,24	728,78
18	446,57	486,55	546,14	541,71	598,44	650,81	684,91	725,01	753,94	784,76	794,70
20	493,82	536,67	600,97	594,84	655,70	711,60	747,40	789,77	819,90	851,80	861,14
22	541,07	586,80	655,80	647,97	712,96	772,39	809,89	854,52	885,85	918,83	927,59
24	588,32	636,93	710,63	701,10	770,22	833,18	872,37	919,28	951,80	985,87	994,03
26	634,64	686,08	764,39	753,19	826,36	892,78	933,64	982,76	1016,46	1051,60	1059,17
28	681,89	736,21	819,21	806,32	883,62	953,56	996,12	1047,52	1082,42	1118,64	1125,61
30	729,15	786,34	874,04	859,45	940,88	1014,35	1058,61	1112,27	1148,37	1185,68	1192,05
32	776,40	836,46	928,87	912,58	998,15	1075,14	1121,10	1177,03	1214,33	1252,72	1258,50
34	823,65	886,59	983,70	965,71	1055,41	1135,93	1183,59	1241,79	1280,28	1319,76	1324,94
36	869,97	935,74	1037,46	1017,79	1111,55	1195,53	1244,85	1305,27	1344,94	1385,48	1390,08
42	1011,54	1085,93	1201,73	1176,97	1283,11	1377,66	1432,06	1499,28	1542,54	1586,34	1589,14
48	1152,74	1235,73	1365,57	1335,74	1454,22	1559,32	1618,79	1692,79	1739,63	1786,67	1787,69
54	1293,93	1385,52	1529,42	1494,50	1625,33	1740,97	1805,52	1886,29	1936,71	1987,00	1986,23
60	1435,13	1535,32	1693,26	1653,26	1796,44	1922,63	1992,25	2079,80	2133,80	2187,33	2184,78
Plano	294,91	329,34	335,50	350,90	361,73	372,05	382,36	395,37	408,37	430,05	451,73
<p>NOTA 1 Os valores de referência dos custos acima consideram todos os materiais necessários e o serviço de montagem.</p> <p>NOTA 2 Custos expressos em R\$/m para tubulações e em R\$/m² para superfícies planas (referência: NOV/2010).</p>											

ÍNDICE DE REVISÕES	
REV. A, B e C	
Não existe índice de revisões.	
REV. D	
Partes Atingidas	Descrição da Alteração
1.1	Revisado
1.4	Incluído
2	Revisado
2.2	Eliminado
3.5 a 3.8	Revisados
4.1.2	Revisado
4.2.2	Incluído
4.2.3 a 4.2.9	Revisados e Renumerados
4.2.7.1 e 4.2.8.1	Eliminados
5.2.2	Revisado
5.3.4	Revisado
5.4	Revisado
Anexo A.1.2	Revisado
Anexo A.3	Revisado
Anexos B.1 e B.3	Revisados
Anexos C.1 e C.3	Revisados
Anexo D.2.3	Inserido
Tabela D.1	Revisada
Anexo D.4.3	Inserido
Tabela E.1	Revisada
REV. E	
Partes Atingidas	Descrição da Alteração
Todas	Revisadas