

1178-01

SÃO PAULO
1987

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA

CONSIDERAÇÕES SOBRE O EMPREGO DE SISTEMAS
DE ISOLAÇÃO TÉRMICA EM ENGENHARIA NAVAL

ADHERBAL CAMINADA NETTO

- À MARINHA DO BRASIL por mais esta oportunidade que me proporcionou. Desta vez, de rever e atualizar meus conhecimentos e obter o honroso título de Mestre em Engenharia.
- Ao meu orientador, Prof. Dr. HERNANI LUIZ BRINATI, pela efetiva, dedicada e paciente orientação.
- Ao prezado amigo, Prof. Dr. ETIARO YAMANE, pelo empréstimo de livros e pela gentileza de discutir diversos assuntos relativos ao nosso campo comum de interesse.
- Aos prezados amigos e antigos chefes, CMG (EN-RRM) JORGE PINHEIRO DA COSTA VEIGA e ALVARO JOSE DE ALMEIDA CALEGARE, pelo incentivo dado a todos os seus oficiais para que aprimorassem constantemente seus conhecimentos.
- Ao 3ºSG-ES FRANCISCO GOMES DA SILVA, pelo excelente trabalho de datilografia e pela boa vontade com que suportou inúmeras alterações.
- À Sra. MARLEI S. DE ARAUJO SILVA, pelo esmero na elaboração da capa e de diversas figuras.
- À minha ESPOSA e FILHOS, pela compreensão nas intermináveis horas de estudo e incondicional apoio em todos os instantes.

AGRADECIMENTOS

RESUMO

Este trabalho procura apresentar, de forma concatenada e abrangente, os princípios fundamentais que devem nortear o emprego dos sistemas isolantes em inúmeras aplicações em estáleiros, a bordo de navios, de estruturas oceânicas e nas mais diversas atividades ligadas ao mar.

Inicialmente, após uma introdução para apresentar o assunto a ser tratado, aborda-se de forma sucinta os fundamentos da transmissão de calor, com o objetivo de colocar o assunto em sua perspectiva científica correta.

Em seguida, apresenta-se as finalidades e aplicações da isolamento térmica e se ressalta a importância dessa área técnica, não apenas nas aplicações "marítimas", mas para toda a atividade industrial e comercial do País.

Segue-se uma abordagem das características e propriedades dos materiais que compõem um sistema isolante: materiais isolantes propriamente ditos, materiais de revestimento e vedação e materiais de fixação.

Em seguida, trata-se dos aspectos relativos ao projeto dos sistemas isolantes, incluindo exemplo ilustrativo de um procedimento que pode ser adotado para projetar sistemas com qualquer grau de complexidade.

Finalmente, apresenta-se algumas idéias para pesquisas futuras.

ABSTRACT

This work is an attempt to present in a coherent and comprehensive way the fundamental principles which should guide the use of thermal insulation systems in shipyards, on board ships and offshore structures, and in all sorts of sea-related activities.

Following an introduction some brief considerations on the fundamentals of heat transfer are made in order to place the subject within its correct scientific perspective.

Then the main functions of thermal insulation systems are enumerated and the importance of this technical area, not only to the "maritime" field but also to the whole of industrial and commercial activities in this country is emphasized.

There follows a discussion of the characteristics and properties of those materials which make up thermal insulation systems: insulating materials proper, covering and sealing materials, and accessories.

The main aspects relating to the design of thermal insulation systems are then introduced, and an example is given which illustrates one type of procedure for the design of thermal insulation systems with any degree of complexity. Finally some ideas for future research are put forward.

INDICE GERAL

AGRADECIMENTOS..... 1

RESUMO..... 11

ABSTRACT..... 111

INDICE GERAL..... 1v

NOMENCLATURA..... viii

LISTA DE FIGURAS..... xi

LISTA DE TABELAS..... xiii

PREFACIO..... xiv

CAPITULO I - INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES TERMINOLÓGICAS..... 1.1

1.2 - A ISOLAÇÃO TÉRMICA NAS ATIVIDADES LIGADAS À ENGE
NHARIA NAVAL..... 1.3

1.3 - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA..... 1.6

1.4 - OBJETIVO DO TRABALHO..... 1.8

1.5 - LINHAS GERAIS DO TRABALHO..... 1.9

CAPITULO II - FUNDAMENTOS DA TRANSMISSÃO DE CALOR

2.1 - MODOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR..... 2.1

2.1.1 - CONDUÇÃO..... 2.1

2.1.1.1 - Natureza da Condução de Calor..... 2.1

2.1.1.2 - Lei de Fourier..... 2.2

2.1.1.3 - Equação Geral da Condução..... 2.3

2.1.1.4 - Casos Particulares da Equação Geral da
Condução..... 2.4

2.1.1.5 - Métodos de Solução..... 2.5

2.1.2 - CONVECÇÃO..... 2.8

2.1.2.1 - Natureza da Convecção..... 2.8

2.1.2.2 - Equação de Newton..... 2.9

2.1.2.3 - Determinação do Coeficiente de Película..... 2.9

2.1.3 - RADIAÇÃO..... 2.13

2.1.3.1 - Natureza da Radiação..... 2.13

2.16	2.1.3.2 - Comportamento das Superfícies Reais.....
2.17	2.1.3.3 - Trocas de Energia por Radiação.....

CAPITULO III - FINALIDADES E APLICAÇÕES DA ISOLAÇÃO TERMICA

3.2	3.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....
3.2	3.2 - MANUTENÇÃO DA TEMPERATURA E CONTROLE DO FLUXO DE CALOR.....
3.4	3.2.1 - SISTEMAS ISOLANTES PARA ALTA TEMPERATURA.....
3.5	3.2.2 - SISTEMAS ISOLANTES PARA BAIXA TEMPERATURA.....
3.6	3.2.3 - IMPORTANCIA DOS SISTEMAS ISOLANTES EM NÃ VIOS.....
3.8	3.3 - PROTEÇÃO DO PESSOAL.....
3.9	3.4 - PROTEÇÃO CONTRA INCENDIO.....
3.12	3.4.1 - COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS EM RELAÇÃO AO FOGO.....
3.14	3.4.2 - DIFUSIVIDADE TERMICA.....
3.15	3.5 - CONSERVAÇÃO DA ENERGIA E ECONOMIA DE RECURSOS.....
3.15	3.5.1 - A IMPORTANCIA DE CONSERVAR ENERGIA.....
3.16	3.5.2 - REDUÇÃO DAS PERDAS DE CALOR.....
3.22	3.5.3 - CÃLCULO DA ESPESSURA ECONOMICA.....
3.22	3.5.3.1 - O método de McMillan.....
3.27	3.5.3.2 - O método de Harris.....
3.30	3.5.3.3 - Exigências Técnicas.....

CAPITULO IV - MATERIAIS PARA ISOLAÇÃO TERMICA

4.2	4.1 - MATERIAIS ISOLANTES.....
4.2	4.1.1 - TIPOS.....
4.4	4.1.2 - FORMAS.....
4.5	4.1.3 - PROPRIEDADES.....
4.5	4.1.3.1 - Faixa de Temperatura de Aplicação.....
4.8	4.1.3.2 - Condutibilidade Térmica.....
4.8	4.1.3.2.1 - Grupos de materiais.....
4.13	4.1.3.2.1 - Principais fatores que afetam o valor da condutibilidade dos isolantes.....
4.18	4.1.3.3 - Resistência à Vibração.....
4.19	4.1.3.4 - Absorção de Líquidos.....
4.20	4.1.3.5 - Resistência ao Fogo.....

5.24	5.7 - EXEMPLO.....
5.22	5.6.1.3 - Isolação de Redes e Canalizações.....
5.21	5.6.1.2 - Ajuste e Vedação.....
5.20	5.6.1.1 - Diferença de Temperaturas.....
5.20	5.6.1 - RECOMENDAÇÕES PARA INSTALAÇÃO.....
5.20	5.6 - PROJETO FÍSICO DO SISTEMA.....
5.18
5.16	5.5.3 - CÁLCULO DA ESPESSURA PARA EVITAR CONDENSÃO E RADIAÇÃO.....
5.15	5.5.2 - CÁLCULO DAS PERDAS DE CALOR POR CONVECÇÃO.....
5.12	5.5.1.3 - Paredes Esféricas.....
5.11	5.5.1.2 - Paredes Cilíndricas.....
5.11	5.5.1.1 - Paredes Planas.....
5.11	5.5.1 - CÁLCULO DAS PERDAS DE CALOR POR CONDUÇÃO.....
5.11	5.5 - DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DE ISOLANTE NECESSÁRIA. DO SISTEMA.....
5.10	5.4 - SELEÇÃO DOS MATERIAIS QUE ATENDEM OS REQUISITOS.....
5.9	5.3 - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES NECESSÁRIAS.....
5.3	5.2.1 - CONDIÇÕES DE OPERAÇÕES.....
5.2	CAS QUE O SISTEMA DEVE DESEMPENHAR.....
5.1	5.2 - ESTABELECEMENTO DOS REQUISITOS E DAS FUNÇÕES BÁSI 5.1 - INTRODUÇÃO.....

CAPÍTULO V - PROJETO DE SISTEMAS ISOLANTES

4.42	4.3 - MATERIAIS DE FIXAÇÃO.....
4.41	4.2.2.5 - Requisitos Econômicos.....
4.40	4.2.2.4 - Requisitos de Segurança.....
4.38	4.2.2.3 - Requisitos Térmicos.....
4.37	4.2.2.2 - Requisitos Químicos.....
4.27	4.2.2.1 - Requisitos Físicos.....
4.27	4.2.2 - PROPRIEDADES.....
4.25	4.2.1 - CATEGORIAS.....
4.25	4.2 - MATERIAIS DE REVESTIMENTO E VEDAÇÃO.....
4.24	4.1.3.6 - Propriedades Desejáveis dos Isolantes.....

BIBLIOGRAFIA

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

INCENDIOS

APENDICE - BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE A NATUREZA DOS

- 6.1 - TABELAS E FÓRMULAS "MAGICAS".....
- 6.2 - ABORDAGEM PROFISSIONAL.....
- 6.3 - SUGESTÕES.....
- 6.4 - OBSERVAÇÃO FINAL.....
- 6.5

CAPÍTULO VI - CONSIDERAÇÕES FINAIS

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
A	Area disponível para transmissão de calor.
\bar{A}	Area média logarítmica.
A*	Area média geométrica.
A^m	Area média aritmética.
a	Absortividade.
b	Custo do sistema isolante por unidade de área, por unidade de espessura, por ano.
C	Custos fixos do sistema isolante; constante a ser determinada experimentalmente.
c	Calor específico.
D	Dimensão significativa (diâmetro) para condutos cilíndricos.
F_e	Fator de emissividade.
$F_{i,j}$	Fator de configuração.
h	Coefficiente de película.
h_c	Coefficiente combinado de convecção e de radiação.
h_r	Coefficiente de radiação.
k	Condutibilidade térmica.
$k_1 \dots k_n$	Condutibilidades térmicas das diversas camadas de uma parede composta.
L	Comprimento de superfícies cilíndricas.
M	Custo do KW-h.
m	Custo anual das perdas de calor, por unidades de área, para superfícies planas.
m'	Custo anual das perdas de calor, por unidade de área, para superfícies cilíndricas.
n	Custo anual do sistema isolante, por unidade de área, para superfícies planas; direção genérica de transmissão de calor; última camada do sistema isolante.
n'	Custo anual do sistema isolante, por unidade de área, para superfícies cilíndricas.
Nu	Numero de Nusselt.
P	Perímetro molhado.
Pg	Pressão de saturação.

Pr	Numero de Prandtl.
Pv	Pressão parcial do vapor no ar.
q"	Quantidade de energia convertida no interior de um sistema.
q	Quantidade de calor transmitida na unidade de tempo;
q _{cv}	Perdas de calor por convecção.
q _o	Perdas térmicas sem isolante.
q _r	Perda de calor por radiação.
R	Resistência térmica.
Re	Numero de Reynolds.
r	Refletividade.
r _o ...r _n	Raios das diversas camadas de paredes cilíndricas e esféricas compostas.
T	Temperatura; temperatura do forno decorrido um tempo t; temperatura absoluta da superfície emissora.
T _a	Temperatura do ar ambiente.
T _o	Temperatura do fluido na corrente principal; temperatura inicial do forno; temperatura da superfície interna de um sistema isolante.
T ₁ ...T _{n-1} ...T _n	Temperaturas das diversas camadas de uma parede composta.
T _n	Temperatura da superfície externa de um sistema isolante.
T _v	Ponto de orvalho.
t	Transmissividade; tempo de teste.
U	Condutância térmica; energia interna.
Y	Numero de horas de operação por ano.
Y	Custo total do sistema isolante.
α	Difusividade térmica.
Δx	Espessura de parede plana.
Δx ₁ ...Δx _n	Espessuras das diversas camadas de uma parede plana composta.
e	Emissividade.

SÍMBOLO SIGNIFICADO

∇	Laplaciano.
ϕ	Umidade relativa.
σ	Constante de Stefan-Boltzmann.
ρ	Densidade.
n	Coefficiente de resistência à difusão de vapor.

SÍMBOLO

SIGNIFICADO

LISTA DE FIGURAS

PÁGINA	FIGURA	TÍTULO
2.6	2.1	Condução unidimensional de calor em regime permanente através de uma parede plana.....
2.14	2.2	Influência da temperatura na forma da curva espectrorradiométrica de um emissor perfeito..
3.17	3.1	Perda de calor em tubos com temperatura superficial de 75°C.....
3.17	3.2	Idem, com temperatura superficial de 150°C.....
3.18	3.3	Idem, com temperatura superficial de 300°C.....
3.18	3.4	Idem, com temperatura superficial de 600°C.....
3.20	3.5	Composição gráfica de custos.....
3.26	3.6	Evolução da espessura econômica para dois materiais isolantes.....
3.26	3.7	Custo real do sistema para um dado diâmetro de canalização.....
3.27	3.8	Espessura econômica com base nos custos dos fabricantes e empreiteiros.....
3.29	4.1	Variação da condutibilidade térmica com a temperatura para alguns materiais isolantes comuns.....
4.13	4.2	Variação da condutibilidade térmica com a densidade de materiais fibrosos.....
4.15	4.3	Variação da condutibilidade térmica com a densidade relativa de diversas madeiras.....
4.15	4.4	Variação da condutibilidade térmica com a densidade do poliestireno expandido.....
4.16	4.5	Programa térmico padrão.....
4.23	4.6	Esforços externos sobre o revestimento.....
4.28	4.7	Efeito do deslocamento diferencial sobre o revestimento.....
4.29	4.8	Efeito da expansão diferencial sobre o revestimento.....
4.30	4.9	Pontos vulneráveis nas barreiras de vapor.....
4.36	5.1	Sistema isolante típico para carga de turбина marítima.....
5.4		

PÁGINA		FIGURA
5.7	Distribuição média de temperatura da água do mar na costa brasileira.....	
5.12	Condução de calor através de uma parede plana composta.....	5.3
5.13	Parede cilíndrica.....	5.4
5.14	Erro percentual quando se substitui A^m por \bar{A} para superfícies cilíndricas.....	5.5
5.15	Paredes cilíndricas e esféricas compostas.....	5.6
5.17	Erro percentual quando se substitui A^m por A^* para superfícies esféricas.....	5.7
5.23	Agrupamento de pequenas redes em um sistema isolante único.....	5.8
5.29	Sistema isolante termo-acústico para dutos de ar.....	5.9
A.2	Evolução do incêndio.....	A.1

LISTA DE TABELAS

PÁGINA

TABELA

3.1	Emissividade de alguns materiais comumente utilizados.....	3.9
3.2	Variação da temperatura superficial (°C) com.....	3.10
3.3	Eficiência do sistema isolante.....	3.19
4.1	Temperatura máxima aproximada de operação para alguns materiais isolantes típicos.....	4.7
4.2	Condutibilidade térmica de alguns metais.....	4.9
4.3	Condutibilidade térmica de alguns líquidos saturados.....	4.12
4.4	Condutibilidade térmica do ar na pressão atmosférica.....	4.12
4.5	Condutibilidade térmica do vapor d'água na pressão atmosférica.....	4.12
4.6	Valores típicos de permeância ao vapor d'água.....	4.33
4.7	Coefficientes de resistência (u) para materiais secos.....	4.34
4.8	Coefficientes de resistência (u) para diversos materiais.....	4.35
4.9	Estabilidade de placas de poliestireno expandido aos produtos químicos.....	4.37
5.1	Valores recomendados para condições externas.....	5.8
5.2	Perdas térmicas, em watts, para flanges isolados e não isolados.....	5.22
5.3	Espessuras de isolante, em mm, empregadas no cálculo dos valores da tabela 5.2.....	5.23
5.4	Eficiência do sistema isolante para o duto de ar.....	5.28

Em todas as partes em que dividi o trabalho, procurei ser fiel ao propósito de, na medida de minha capacidade, apresentar idéias e dados que possam ser de utilidade para outros. Para tan

Além disso, para quem passou uns bons onze anos de sua vida em estaleiros, a necessidade de elaborar uma dissertação acadêmica constitui oportunidade inestimável de consolidar os conhecimentos adquiridos e as experiências vividas na prática diária das oficinas, dos cascos em construção e das salas de projeto.

F com satisfação que submeto ao exame de mestres e colegas o trabalho contido nas páginas que se seguem. E isto porque trata ele de um assunto que me é particularmente caro e ao qual tenho dedicado boa parcela de minha vida profissional como engenheiro.

P R E F Á C I O

RENE DESCARTES (1637)

Aqueles cujo raciocínio é mais vago e que melhor ordenam seus pensamentos, com a finalidade de torná-los claros e inteligíveis, podem sempre persuadir melhor os outros daquilo que propõem, mesmo que façam apenas breves referências e jamais tenham estudado retórica.

to, estorcei-me por empregar uma linguagem simples e direta, sem pre atento ao inestimável conselho de Descartes que encima este prefácio. Assim, tentei evitar as considerações tortuosas e os algebrismos exaustivos, que podem dar ao leitor apressado a falsa ideia de erudição, mas que, com certeza, seriam descartados pelo examinador atento como simplesmente desnecessários.

Agradeço a todos que tiverem a paciência de ler este trabalho e queiram me enviar seus comentários, críticas e sugestões, pois é da troca de ideias e experiências que se alimentam o conhecimento e o progresso da espécie humana a que pertencemos todos.

Mais recentemente, talvez sob a irresistível influência do termo inglês "insulation", pois é pouco provável que a vontade de mudar tenha sido originalmente provocada pela palavra francês sa análoga "isolation", passou-se a utilizar a expressão isolação térmica, sendo esta, inclusive, a denominação do CB-22, com

Tradicionalmente, o campo da técnica que trata de isolar as superfícies de construções, máquinas, equipamentos e canalizações do contato com o ar ambiente ou com outras superfícies era chamado em português de isolamento térmico, a semelhança do espanhol "aislamiento térmico". Isto não apenas no Brasil mas também em Portugal, a julgar pelo título da tradução da obra de FRENOT | I | editada em Lisboa.

1.1 CONSIDERAÇÕES TERMINOLÓGICAS

INTRODUÇÃO

W. SHAKESPEARE (1597)

Aquilo que chamamos nome
aa, com qualquer outro nome
teria o mesmo agradável per
fume.

CAPÍTULO I

té da Associação Brasileira de Normas Técnicas destinado a este campo específico, de inegável importância para toda a indústria.

É possível que a entidade normalizadora nacional tenha sido levada a adotar o termo isolação na tentativa de evitar confusões com o isolamento elétrico e, assim, facilitar a catalogação e a pesquisa bibliográfica. Pode ser também, que a mudança de nome tenha sido motivada pela louvável disposição de ressaltar a personalidade própria dessa área técnica. Ou até mesmo, como sugerido antes, pela simples imitação de uma cultura estrangeira.

Qualquer que tenha sido o motivo, no entanto, o importante é que se tenha hoje uma padronização, mesmo que ela difira da que teria sido a escolha pessoal do autor.

Há muitos anos este autor está convencido, que o investimento sério em padronização industrial é um dos fatores decisivos para o progresso deste País. Conseqüentemente, ao contrário do que havia sido feito em trabalhos anteriores, CAMINADA | 2 | e | 3 | por exemplo, passa-se a utilizar a expressão isolação térmica neste e em trabalhos futuros, como uma pequena contribuição a um esforço que, se acredita, deva ser de todos nós brasileiros.

Para concluir, é interessante lembrar que ambos os vocábulos coexistem na riqueza de nossa língua e que, tanto isolação, quanto isolamento, derivam da mesma palavra latina "insula", 1 lha, transmitindo, portanto, a mesma idéia de segregação.

1.2 A ISOLAÇÃO TÉRMICA NAS ATIVIDADES LIGADAS À ENGENHARIA

VAL

Para muitos que presenciaram os dias agitados dos anos 70, essa década será lembrada como a época da grande crise de energia, da OPEP, das "sete irmãs do petróleo", e dos racionamentos de combustível em todo o Mundo. No futuro, entretanto, é possível que aquele período seja visto de uma maneira mais positiva, como a década em que as nações tiveram a inestimável oportunidade de aprender a importar a ligação, de que reduzir ao mínimo o desperdício é tão vital quanto encontrar novas fontes de energia;

De lá para cá, a Comunidade Marítima Internacional, a exemplo de inúmeros outros grupos que representam a atividade produtiva do homem, tem dedicado uma parcela considerável de seus esforços à colocação em prática dos ensinamentos recebidos, ou seja, à redução dos gastos com combustível e à racionalização do uso da energia disponível.

No campo específico da armação mercante, por exemplo, constitui um exemplo nítido deste esforço o desenvolvimento de novas versões de máquinas propulsoras, motores e turbinas, na tentativa de obter consumos específicos mais favoráveis e permitir a utilização de combustíveis mais baratos, com a finalidade de manter a competitividade dos fretes oferecidos.

Um outro exemplo neste campo vem sendo dado por armadores

Diversas podem ser as abordagens para o "problema energético", com diferentes graus de complexidade. Todavia, de todas as medidas que se pode tomar para racionalizar a utilização de energia na indústria, na construção civil, em aplicações comerciais ou a bordo de navios e plataformas oceânicas, talvez a mais simples, e de eficácia comprovada, seja promover a adequada isolamento térmica de estruturas, máquinas, equipamentos e canalizações a que se entede por isolamento "adequada" e o que procuraremos a

As marinhas de guerra, por sua vez, premidas pela necessidade de de projetar plataformas cada vez mais eficientes para o transporte dos sistemas de armas em constante e rápida evolução, também não têm ficado indiferentes ao problema. Um testemunho recente deste fato é o número crescente de trabalhos técnicos nesta área que têm aparecido na literatura naval das principais nações marítimas nos últimos anos. Veja-se, por exemplo, seções dos dentre inúmeros trabalhos publicados pela Marinha Norte-Americana, os de DEAN | 4 |, SCHATZBERG | 5 |, DANGEL | 6 |, DETOLLA | 7 |, PEHLIVAN | 8 | e MASTRONARDE | 9 |.

em diversos países, ao promoverem a modernização de navios suas frota visando a obter um maior rendimento do conjunto casco-motor-hélice. Essas modificações geralmente compreendem a substituição de instalações com turbinas a vapor ou a gás mais antigas pela última geração de motores diesel de baixa rotação, bem como, em muitos casos, alterações de monta na popa para permitir a substituição de múltiplos hélices por um único hélice na linha de centro, acionado diretamente pelo motor de propulsão.

bordar ao longo deste trabalho. Quanto à sua simplicidade e eficiência, no entanto, chama-se a atenção do leitor para a introdução do texto do Ministério da Energia do Reino Unido [10], onde se diz que o emprego de sistemas isolantes eficientes, utilizando materiais de pronta obtenção e que podem ser aplicados na maioria das vezes de maneira fácil e rápida, sem interromper a operação ou processo, provavelmente contribui tanto para o esforço nacional britânico de conservação de energia quanto outras linhas de ação mais sofisticadas, com a vantagem de estar ao alcance de todas as indústrias que utilizam o calor, qualquer que seja a aplicação.

A preocupação em conservar a energia disponível e economizar recursos, contudo, apesar de sua modernidade e importância, está longe de constituir a única aplicação dos sistemas de isolamento térmica. Ao contrário, como se verá no decorrer do trabalho, estes sistemas vêm sendo utilizados há longo tempo na indústria em geral, e nas atividades ligadas aos oceanos em particular, para possibilitar a realização prática de um sem número de processos; na manutenção das temperaturas adequadas ao funcionamento dos ciclos reais das instalações propulsoras e de geração de energia; na proteção do pessoal; no aumento da segurança contra incêndios; no condicionamento ambiental; na preservação de alimentos; na proteção e conservação de cargas sensíveis e perecíveis; e em inúmeras outras aplicações.

A importância prática dos sistemas de isolamento térmica para as atividades ligadas ao mar, portanto, justifica que se investi-

Mesmo os livros sobre transmissão de calor, que costumavam incluir um ou mais capítulos específicos sobre isolamento térmica, como o de JAKOB e HAWKINS |13|, por volta da década de 50 passaram a suprimir essas partes, e este fato era explicitamente comentado nos prefácios, contribuindo para agravar a escassez de bons textos sobre o assunto. É interessante notar, no entanto, que este fenômeno parece ter acontecido de forma mais branda na União Soviética, pois a isolamento térmica ainda continuava a merecer pelo menos um item específico no livro de MIKHAYEV |14| em

Quem se interessa por isolamento térmica no Brasil provavelmente já terá constatado que praticamente inexitem textos em português, sejam trabalhos isolados, livros ou mesmo simples postilas. Em outras línguas a situação se modifica, mas apenas no que diz respeito a trabalhos isolados, que existem em número razoável em inglês, francês ou alemão. Mas, mesmo nos Estados Unidos, a exceção do clássico manual de TURNER e MALLOY |11|, não é comum encontrar hoje em dia livros que apresentem uma visão concatenada dos diversos tópicos exigidos para uma abordagem abrangente do assunto, como fazia WILKES |12| em 1950.

1.3 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

que cuidadosamente os fundamentos científicos e técnicos que devem nortear o projeto, a instalação e a manutenção dos sistemas isolantes, bem como a obtenção e fabricação dos diversos materiais empregados para compor esses sistemas.

Esta situação, após os sucessivos "choques do petróleo", já rece estar felizmente se alterando, uma vez que os especialistas foram novamente convocados, especialmente a partir da década passada, a estudar e resolver inúmeros problemas novos de isolamento térmica, relacionados tanto com a preocupação global com a conservação de energia, quanto com progressos tecnológicos recém servação de energia, especialmente na área de criogenia.

No tocante às propriedades dos materiais isolantes, a situação é ainda mais penosa do que a falta de informações relativas ao conhecimento aplicado de transmissão de calor. À exceção da literatura técnica fornecida pelos fabricantes, pouco existe no Brasil que possa orientar os interessados. Nestas publicações, como é de se esperar, cada fabricante procura enumerar dados genéricos, que fornecem uma idéia sobre o produto ao maior número possível de utilizadores em potencial. Informações mais precisas só são geralmente fornecidas por solicitação expressa do cliente.

Para se ter uma idéia representativa dos produtos de interesse naval disponíveis no mercado brasileiro, bem como do tipo de informação normalmente suprida pelos fabricantes, sugere-se ao leitor o exame de CAMINADA, et al. |15|.

No que diz respeito ao projeto e instalação de sistemas isolantes em navios, a literatura é menos escassa, e isto principalmente em virtude das publicações das marinhas de guerra de diversos países que nos chegam às mãos. Veja-se, por exemplo, ESTADOS UNIDOS |16| e REINO UNIDO |17|. Além disso, há os Boletins da

1.8

SNAME |18| e |19|, que tecem interessantes e importantes considerações sobre a isolação térmica, respectivamente, de estruturas de aço e de alumínio, além de fornecerem dados sobre combinações de materiais existentes no mercado norte-americano. Infelizmente, porém, não existe uma publicação semelhante da SNAME para máquinas, equipamentos e canalizações de navios mercantes. E certamente não existem textos específicos sobre qualquer um desses assuntos publicados em nosso País, com dados e recomendações similares, mas feitos levando-se em conta as propriedades dos materiais disponíveis em nosso mercado.

1.4 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do presente trabalho, visando a preencher uma lacuna que o autor acredita existir na bibliografia pesquisada, é apresentar de forma concatenada e abrangente os princípios físicos fundamentais, que devem nortear o emprego dos sistemas isolantes em inúmeras aplicações em estaleiros, a bordo de navios, de estruturas oceânicas e nas mais diversas atividades ligadas ao mar.

Além disso, pretende-se discutir os principais aspectos relativos aos materiais empregados, ressaltando-se as características e propriedades cuja importância o engenheiro e o técnico responsáveis não podem desconhecer e cujos valores devem ser medidos e fornecidos pelos fabricantes e/ou empreiteiros instalados.

res.

Finalmente, objetiva-se fornecer algumas recomendações básicas sobre o projeto e a instalação correta de sistemas isolantes, chamando sempre a atenção para sua importância econômica, técnica e estratégica dentro do contexto industrial moderno, de modo a levar o leitor a compreender o profissionalismo com que se deve abordar este assunto, de vital importância para os países industriais, ao contrário da maneira empírica e despreparada com que o vemos frequentemente tratado.

1.5 LINHAS GERAIS DO TRABALHO

Nos capítulos que se seguem, faz-se inicialmente uma abordagem sucinta dos fundamentos da transmissão de calor, indispensável para colocar o assunto dentro de sua perspectiva científica correta.

Em seguida, aborda-se as finalidades e aplicações da isolação térmica, de modo a dar ao leitor a visão da magnitude e importância do problema, que transcende em muito o campo simples mente "marítimo" e se espalha por toda a atividade industrial e comercial do País.

Segue-se a abordagem das características e propriedades dos materiais utilizados para efetivamente realizar a ação isolante, bem como de todos aqueles outros materiais coadjuvantes que, em conjunto com os primários, vão compor o que aqui denominamos de sistemas isolantes.

Finalmente, são tratados os aspectos relativos ao projeto dos sistemas isolantes, e se ressalta a importância de que não apenas o projeto seja bem elaborado, mas que também a instalação seja realizada da forma mais esmerada possível.

CAPÍTULO II

O calor em si, em sua natureza e essência, é movimento e nada mais.

FRANCIS BACON (1620)

FUNDAMENTOS DA TRANSMISSÃO DE CALOR

A transmissão de calor é identificada como a forma de propagação de energia que resulta da existência de diferenças de temperatura entre dois sistemas quaisquer.

Para permitir a abordagem de fenômenos intrinsecamente complexos, faz-se tradicionalmente a distinção entre três mecanismos ou modos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação.

2.1 MODOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR

2.1.1 CONDUÇÃO

2.1.1.1 Natureza da Condução de Calor

É o mecanismo que provoca a transmissão de energia entre regiões de um meio em repouso, sólido, líquido ou gasoso, ou entre meios diferentes, em repouso e em contato físico, em virtude de diferenças de temperatura.

No estado atual do conhecimento, atribui-se a condução a três fenômenos:

a) interação molecular;

b) deslocamento de elétrons livres; e

c) radiação intermolecular.

2.1.1.2 Lei de Fourier

Foi o cientista J.B.J. Fourier quem propôs a relação básica para a transmissão de calor por condução(*). Baseando-se em suas observações dos trabalhos de Biot, Fourier verificou que a quantidade de calor transmitida na unidade de tempo através de um dado material, em uma direção qualquer \bar{n} , era proporcional à área disponível para a transmissão de calor e ao gradiente de temperatura, ou seja:

$$\delta q = k \cdot dA \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.1)$$

onde:

δq - é a quantidade de calor transmitida na unidade de tempo, em W;

dA - é a área disponível para troca de calor, em m^2 ;

(*) "Théorie Analytique de la Chaleur", Gouthier-Villars, França, 1822.

2.3

$\partial T / \partial n$ - é o gradiente de temperatura na direção normal à área da, em $^{\circ}\text{C}/\text{m}$; e

k - é a condutibilidade térmica do material, em $\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$.

2.1.1.3 Equação Geral da Condução

A equação (2.1) é sempre aplicável. Se o gradiente de temperatura em um dado ponto, em uma dada direção e em dado instante for conhecido, então a quantidade de calor transmitida na unidade de tempo nesse ponto, nessa direção e nesse instante pode ser determinada diretamente pela equação de Fourier.

Em muitos problemas unidimensionais é possível obter o valor do gradiente de temperatura por meio de simples inspeção da situação física. Nos casos mais complexos, contudo, bem como nos problemas multidirecionais, é preciso estabelecer uma equação baseada na lei da conservação da energia que nos forneça a distribuição geral de temperatura no sistema, a chamada equação geral da condução:

$$\nabla \cdot k \nabla T + \dot{q}''' = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.2)$$

onde:

∇ - é o operador $\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$;

T - é a temperatura em $^{\circ}\text{C}$ como função das coordenadas espaciais x, y, z em metros e do tempo t em segundos;

\dot{q}''' - é a quantidade de energia convertida no interior do sistema considerado, por unidade de tempo e de volume

ρ - é a densidade do material homogêneo no interior do sistema, em kg/m^3 ; e

c - é a capacidade térmica do material, em $\text{J}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$.

c - é o valor específico do material homogêneo, em J/kg.°C.

2.1.1.4 Casos Particulares da Equação Geral da Condução

Para um meio isotrópico, com propriedades materiais supostas independentes da temperatura, pode-se escrever que:

$$\Delta_2 T + \frac{\dot{q}'''}{k} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.3)$$

onde:

$$\Delta_2 - \text{é o operador } \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Para um sistema sem fontes de calor, a equação (2.3) se

reduz à:

$$\Delta_2 T = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.4)$$

onde:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} - \text{é a difusividade térmica do material homogêneo, em m}^2/\text{s.}$$

Esta equação é comumente chamada de segunda "Lei" de Fourier para a transmissão de calor.

Para um sistema em regime permanente com fontes de calor, a equação (2.3) se reduz à chamada equação de Poisson:

$$\Delta_2 T + \frac{\dot{q}'''}{k} = 0 \quad (2.5)$$

No caso simples de um meio condutor sem fontes de calor e em regime permanente, chega-se à conhecida equação de Lapla

ce:

$$\Delta^2 T = 0 \quad (2.6)$$

2.1.1.5 Métodos de Solução

Os problemas de condução de calor apresentam graus de dificuldade bastante variados de acordo com os diversos fatores que contribuem para aumentar sua complexidade, tais como:

a) número de dimensões necessárias para descrever a distribuição de temperaturas;

b) meios ou corpos com formas complexas;

c) conversão interna de energia; e

d) variação da distribuição de temperaturas com o tempo.

Há pelo menos quatro abordagens básicas para a solução de tais problemas: gráfica, numérica, analógica e analítica.

Comentaremos esta última.

Na abordagem analítica, a solução é contínua ao longo do meio e, uma vez obtida, permite uma grande flexibilidade na análise da influência dos parâmetros do sistema. Infelizmente, a solução exata da equação de condução de calor apropriada, satisfazendo as condições de contorno especificadas, só pode ser obtida analiticamente para situações relativamente simples. Tal é o caso, contudo, de inúmeras aplicações práticas

em isolamento térmica onde, adotando-se hipóteses simplificadas convenientes, pode-se resolver as equações com relativa facilidade e chegar a expressões de grande utilidade, como as que são apresentadas no Capítulo V : PROJETO DE SISTEMAS ISO

ANTES.

A título de exemplo, mostra-se a seguir a solução analítica da equação diferencial adequada para o caso bastante simples, ilustrado esquematicamente pela figura 2.1, de condução unidirecional em regime permanente.

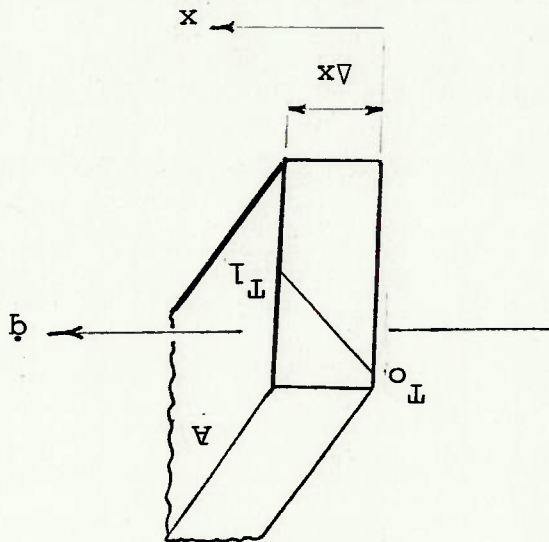


Fig. 2.1 - Condução unidimensional de calor em regime permanente através de uma parede plana.

Consideremos uma seção de uma parede plana infinita de material isotrópico com espessura Δx . Suponhamos que todos os pontos da face esquerda da parede se encontrem na temperatura T_0 e que a temperatura igualmente uniforme da face direita seja T_1 , de modo que a distribuição de temperaturas no interior da parede seja estritamente unidimensional, dependendo apenas da coordenada espacial \bar{x} . Suponhamos ainda, que não haja con

versões internas de energia.

A equação aplicável neste caso é a equação de Laplace (2.6), com as seguintes condições de contorno:

- a) $T = T_0$ para $x = 0$; e
- b) $T = T_1$ para $x = \Delta x$.

Integrando-se duas vezes a equação (2.6), obtém-se inicialmente o gradiente de temperatura e, em seguida, a solução para a distribuição de temperaturas:

$$(2.7) \quad \frac{dT}{dx} = c_1$$

$$(2.8) \quad T = c_1 x + c_2$$

Utilizando as condições de contorno, pode-se calcular o valor das constantes de integração c_1 e c_2 e chegar finalmente às seguintes expressões:

$$(2.9) \quad \frac{dT}{dx} = \frac{\Delta x}{(T_0 - T_1)}$$

$$(2.10) \quad T = T_0 - (T_0 - T_1) \frac{\Delta x}{x}$$

Combinando-se (2.9) com (2.1) na forma adequada para as hipóteses simplificadoras feitas, obtém-se uma expressão para o cálculo da quantidade de calor transmitida na unidade de tempo através da parede:

$$(2.11) \quad \dot{q} = \frac{R}{T_0 - T_1} W$$

O estudo da convecção diz respeito à transmissão de calor entre uma superfície sólida a uma dada temperatura e um fluido adjacente a uma temperatura diferente. Observa-se que a temperatura da massa de fluido deve ser tomada a uma distância tal da superfície sólida, que o gradiente de temperatura na direção perpendicular a esta seja desprezível. Em outras palavras, deve-se medir a temperatura da massa de fluido de maneira que o seu valor não venha a ser influenciado pelo valor da temperatura da parede sólida adjacente.

A convecção é essencialmente uma forma modificada da condução, na qual o meio se desloca internamente. Dessa maneira, verifica-se uma superposição de transferência macroscópica de energia ao processo microscópico de condução de calor. Tais deslocamentos internos estão necessariamente restritos aos meios fluidos. Se forem causados por diferenças de densidade em virtude de variações de temperatura no seio do fluido, tem-se o mecanismo conhecido como convecção livre ou natural. Por outro lado, se forem provocados por um agente externo, tem-se a chamada convecção forçada.

2.1.2.1 Natureza da Convecção

2.1.2 CONVECÇÃO

$$R = \frac{\Delta x}{k \cdot A} \quad - \quad \text{é a resistência térmica, em } ^\circ\text{C/W.}$$

onde:

2.1.2.2 Equação de Newton

Isaac Newton propôs em 1701 a seguinte expressão para a transmissão de calor entre sólido e fluido:

$$q = h \cdot A (T_0 - T_1) \quad (2.12)$$

onde:

A - é a área de contato normal à direção do fluxo de calor, em m²; e

h - é o coeficiente de película, em W/m².°C.

A equação de Newton raramente é apresentada em forma vetorial, uma vez que a orientação da superfície em relação à direção de escoamento do fluido adjacente determina a direção da transmissão de calor. Por outro lado, por ser apenas uma definição de h e não a expressão de uma lei que descreva o fenômeno no da convecção, esta equação aparenta uma falsa simplificação, pois a determinação do valor do coeficientes de película, que depende do tipo de escoamento do fluido, das propriedades deste, da geometria do escoamento e da diferença de temperatura entre a corrente de fluido e a parede sólida considerada, é via de regra uma tarefa complexa nos problemas de engenharia.

2.1.2.3 Determinação do Coeficiente de Película

Em qualquer tipo de escoamento, há sempre uma película de fluido, algumas vezes extremamente fina, adjacente à superfície sólida, na qual o escoamento é laminar. Como se sabe, as

regiões de escoamento laminar são caracterizadas por trocas moleculares de quantidade de movimento. O mesmo se dá com a energia, e o calor é transmitido através de uma película laminar por meio de fenômenos moleculares, ou seja, por condução. Além disso, a maior resistência à transmissão de calor nos problemas convectivos é aquela oferecida por este processo de condução na película laminar. Consequentemente, parece razoável associar a dificuldade em transferir calor entre uma superfície sólida e o fluido adjacente à espessura da película laminar, e existe uma considerável diferença na velocidade de transmissão de calor se, para uma dada configuração, o escoamento passa de laminar a turbulento.

A determinação do coeficiente de película, que corresponde de na verdade ao próprio estudo do fenômeno da convecção, pode ser conduzida de diversas maneiras. Por exemplo, aplicando-se os métodos de Blasius ou de von Kármán para resolver as equações de Prandtl para a camada limite, utilizando-se a analogia entre a transferência de quantidade de movimento e a transmissão de calor, ou ainda empregando-se a análise dimensional combinada com resultados experimentais.

Utilizando esta última abordagem, W. Nusselt [13] desenhou em 1909 as relações básicas para a convecção forçada e mais tarde, em 1915, as equações para a convecção natural. A aplicação desta técnica à transmissão de calor por convecção forçada entre um tubo e um fluido escoando em seu interior conduz à seguinte expressão:

$$Nu = C(Re)^m \cdot (Pr)^n \quad (2.13)$$

onde:

Nu - é o número de Nusselt;

Re - é o número de Reynolds;

Pr - é o número de Prandtl;

C, m e n - são constantes que devem ser determinadas experimentalmente.

Conhecido o número de Nusselt, obtêm-se imediatamente o valor do coeficiente de película:

$$h = \frac{k}{D} \cdot Nu \quad (2.14)$$

onde D é a dimensão significativa; o diâmetro no caso de condutos cilíndricos.

A utilização de resultados experimentais permite determinar os valores das constantes da equação (2.13) e obter expressões de grande utilidade para projeto, tal como a conhecida equação de DITTMUS-BOELTER:

$$\overline{Nu} = \frac{h \cdot D}{k} = 0,023 (Re)^{0,8} \cdot (Pr)^n \quad (2.15)$$

onde:

n - é uma constante igual a 0,4 quando a temperatura do fluido é inferior à da parede, e igual a 0,3 quando se dá o inverso;

e o travessão (-) colocado sobre Nu e h indica tratar-se de valores médios do número de Nusselt e do coeficiente de película.

2.12 Esta equação é válida para $10.000 < Re < 120.000$, $0,7 < Pr < 120$ e $L/D < 60$, sendo L e D respectivamente o comprimento e o diâmetro do tubo.

É importante lembrar que, ao se utilizar a equação (2.15), as propriedades do fluido devem ser tomadas na temperatura da massa fluida não influenciada pela temperatura da parede, e que a diferença entre essas temperaturas não deve exceder cerca de $5,5^{\circ}\text{C}$ para líquidos e 55°C para gases.

Para valores mais elevados do número de Prandtl, isto é, $0,7 < Pr < 16.700$, e maiores diferenças de temperatura entre a massa de fluido e a parede, recomenda-se utilizar a equação de SIEDER-TATE:

$$\bar{Nu} = \frac{h \cdot D}{k} = 0,023 (Re)^{0,8} \cdot (Pr)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_F}{\mu_P} \right)^{0,14} \quad (2.16)$$

onde:

μ_F - é a viscosidade do fluido tomada na temperatura da massa de fluido;
 μ_P - é a viscosidade do fluido tomada na temperatura da parede;

e as demais propriedades do fluido são tomadas na temperatura da massa de fluido.

Esta equação é válida para $Re < 10.000$ e $L/D < 60$ e, como a equação (2.15), pode ser utilizada para condutos não-circulares desde que o diâmetro D seja substituído pelo chamado diâmetro hidráulico, D_h , dado pela seguinte expressão:

A radiação térmica, que engloba a radiação capaz de sensibilizar nossas vistas na forma de luz visível e corresponde aproximadamente à faixa do espectro eletromagnético representada pelos comprimentos de onda de 0,1 a 100 microns, varia tanto em intensidade, quanto em qualidade, com a temperatura da superfície emissora. A uma dada temperatura, as superfícies emitem energia em uma ampla faixa de comprimentos de onda, e a quantidade de energia emitida em cada comprimento de onda depende, ao mesmo tempo, da temperatura e das características da superfície emissora. A figura 2.2 mostra a distribuição de energia em função do comprimento de onda para um corpo negro ideal, que seria um absorvedor e um irradiador perfeito.

A radiação é o mecanismo de transmissão de calor associado à propagação de ondas eletromagnéticas. Ao contrário da condução e da convecção, a radiação pode se dar tanto no vácuo, quanto através de um meio qualquer.

2.1.3.1 Natureza da Radiação

2.1.3 RADIAÇÃO

- A - é a área da seção transversal do conduto, em m²;
 p - é o perímetro molhado do conduto, em m.

onde:

$$D_h = \frac{4A}{p} \quad \text{m} \quad (2.17)$$

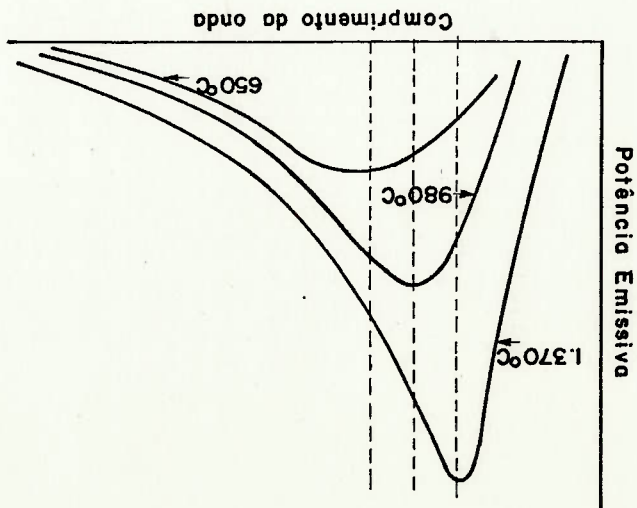


Fig. 2.2 - Influência da temperatura na forma da curva espectrorradiométrica de um emissor perfeito.

Existe evidência experimental que indica que a transmissão de energia radiante entre dois sistemas se dá proporcionalmente à diferença entre as quartas potências das respectivas temperaturas absolutas, enquanto que na condução e na convecção a proporcionalidade se verifica em relação à diferença entre as primeiras potências das temperaturas.

Constata-se também que todos os corpos absorvem e emitem energia, e que a quantidade total de energia radiante emitida na unidade de tempo por um corpo negro é proporcional à área da superfície emissora e à quarta potência da temperatura desta superfície, ou seja:

$$\dot{q}_n = \sigma A T^4 \quad W \quad (2.18)$$

onde:

o índice n se refere a um corpo negro!

$\sigma = 5,7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ é a chamada constante de Stefan-Boltzmann;

A - é a área da superfície emissora, em m^2 ; e

T - é a temperatura absoluta da superfície emissora, em $(^\circ\text{K})^4$.

As superfícies dos corpos reais absorvem e emitem, na unidade de tempo, uma quantidade de energia total menor do que a superfície equivalente de um corpo negro na mesma temperatura, ou seja:

$$q = \epsilon \sigma A T^4 \quad \text{Watts} \quad (2.19)$$

onde ϵ é a emissividade total hemisférica do corpo real, definida pela relação:

$$\epsilon = \frac{q}{q_n} \quad (2.20)$$

Qualquer corpo está continuamente emitindo energia, bem como absorvendo quantidades de energia radiante que sobre ele incidem provenientes do meio que o cerca. Nos corpos reais, porém, toda a energia radiante incidente é absorvida. Parte pode ser refletida e parte pode ser transmitida através do corpo, o que nos leva a escrever:

$$a + r + t = 100\% \quad (2.21)$$

onde:

a - é a absortividade, porcentagem da energia incidente

absorvida pelo corpo;

r - é a refletividade, porcentagem refletida na superfície

do corpo;

t - é a transmitividade, porcentagem que atravessa o cor

po sem ser absorvida.

2.1.3.2 Comportamento das Superfícies Reais

As características radiantes das superfícies reais são influenciadas por diversos fatores, como:

a) direção de emissão - para corpos não-condutores, o valor máximo da emissividade ocorre na direção normal à superfície emissora e varia muito pouco para ângulos de até 45° a partir dessa direção. Para os condutores, a emissividade é relativamente constante para pequenos afastamentos da normal e aumenta com esse afastamento.

b) comprimento de onda - para os metais, a tendência geral é de que a emissividade decresça com o aumento do comprimento de onda. Já para os não-metais a emissividade depende muito pouco do comprimento de onda. Além disso, essa dependência é bem menos conhecida para o comprimento de onda do que para a direção de emissão.

c) temperatura superficial - a emissividade espectral $\bar{\epsilon}_\lambda$ misteriosa das superfícies metálicas aumenta com a temperatura para comprimentos de onda superiores a aproximadamente 5 microns. Para comprimentos menores, invertem-se a variação da emissividade com a temperatura.

Para os não-metais, a emissividade espectral $\bar{\epsilon}_\lambda$ geralmente diminui com o aumento da temperatura.

$$q = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \cdot \epsilon \cdot F_{1j}$$

Para dois corpos reais (cinzentos) mantidos respectivamente em temperaturas diferentes e constantes (regime permanente) T_1 e T_2 , a troca líquida de calor por radiação entre eles pode ser determinada pela seguinte expressão geral:

2.1.3.3 Trocas de Energia por Radiação

Quando a energia radiante que deixa uma superfície é independente da direção, ela é chamada de difusa. E quando a emissividade e a absortividade de uma superfície não variam com o comprimento de onda, a superfície é dita cinzenta. O "corpo cinzento" constitui uma enorme simplificação na análise do comportamento das superfícies reais, mas é de extrema utilidade na prática da engenharia.

- d) Rugosidade superficial - a influência da rugosidade superficial nas características radiantes é muito completa. Assim, é conveniente que os valores de emissividade, ao serem determinados em laboratório, sejam tabelados em função do acabamento superficial.
- e) Impurezas superficiais - a presença de uma camada de óxido, mesmo que extremamente fina, em geral aumenta o valor da emissividade das superfícies metálicas. Para os metais com óxidos coloridos (Fe, Zn, Cr), os valores de emissividade são bem mais elevados do que para os metais com óxidos brancos (Ca, Al, Mg).

onde:

A_i - é a área, em m^2 , do corpo mantido na temperatura T_i ;
 F_e - é um fator de emissividade, que leva em conta o fato de não serem dois corpos negros;
 $F_{i,j}$ - é um fator de configuração, que leva em conta a geometria e a disposição dos corpos.

A equação (2.22) permite encontrar a solução para sistemas relativamente simples. Felizmente, os sistemas térmicos de importância industrial quase sempre podem ser tratados usando-se os coeficientes determinados para essa equação. Para sistemas mais complexos, porém, faz-se necessário determinar um coeficiente de configuração combinado. A tabela 2.1 apresenta valores representativos de F_e e $F_{i,j}$.

Sistema		F_e	$F_{i,j}$
(1)	Corpo pequeno (i) totalmente envolvido por um corpo maior (j)	ϵ_j	1
(2)	Corpo completamente envolvido por outro de dimensões comparáveis, ou dois planos paralelos infinitos	$\frac{\epsilon_i + \frac{\epsilon_j}{1 - \epsilon_j}}{1}$	1
(3)	Esferas concêntricas ou cilindros concêntricos infinitos	$\frac{\frac{\epsilon_i}{1 + \frac{\epsilon_j}{A_i}}}{1}$	1

Tabela 2.1 - Valores representativos dos coeficientes de emissividade e de configuração

Para o sistema (1) da tabela 2.1, a equação (2.22) assume a seguinte forma:

$$\dot{q} = \sigma A_i \epsilon_i (T_i^4 - T_j^4) \quad (2.23)$$

2.19 Esta expressão, embora simples, tem grande aplicação nos cálculos de isolamento térmica, onde frequentemente procuramos determinar as perdas térmicas de superfícies de interesse para o meio ambiente que as cerca.

Neste capítulo nos deteremos naquelas aplicações de interesse geral para a indústria e os transportes, particularmente para a indústria naval e subsidiária e para os veículos e estruturas marítimas.

A utilização de isolantes permeia praticamente todos os campos da atividade humana, desde as vestimentas que protegem do frio, e as aplicações "domésticas" em fogões e refrigeradores, até o revestimento de submarinos nucleares e de veículos espaciais.

Ao longo de sua existência sobre o Planeta, o homem aprendeu gradativamente a utilizar os isolantes térmicos como um fator não apenas para garantir sua sobrevivência, mas também para permitir a construção ao seu redor de um meio ambiente mais confortável.

FINALIDADES E APLICAÇÕES DA ISOLAÇÃO TÉRMICA

CONFÚCIO (-500 A.C.)

A essência do conhecimento é, tendo-o, aplicá-lo.

CAPÍTULO III

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na indústria, a isolamento térmica é empregada em todas as fases relacionadas com a obtenção e comercialização do produto: fabricação, estocagem, transporte e distribuição. Em todas essas etapas os sistemas isolantes desempenham uma ou mais das seguintes funções:

a) conservação dos recursos energéticos disponíveis, muitas vezes escassos e racionados;

b) redução dos custos de produção;

c) controle das temperaturas de processo;

d) controle do fluxo de calor para evitar danos a materiais, equipamentos e instalações;

e) limitação de temperaturas superficiais para proteção do pessoal;

f) proteção contra incêndio; e

g) absorção acústica.

Sempre que na obtenção de um produto tiverem que ser mantidas temperaturas diferentes da temperatura ambiente, os sistemas isolantes passam a ser parte integrante do equipamento e, consequentemente, do processo de produção. Dessa forma, os isolantes são utilizados em praticamente todas as indústrias, incluindo a indústria naval e todas as atividades produtivas ligadas ao mar.

A produção de alimentos congelados, mais especificamente de pescado, constitui um exemplo abrangente da utilização de sistemas de isolamento térmica na obtenção, estocagem, transporte e distribuição.

tribuição do produto. No trajeto entre o ponto de captura e o de processamento, o peixe precisa ser mantido nas frigoríficas ou porões isolados dos navios pesqueiros. Chegando à fábrica, os congeladores de baixa temperatura, que são recintos bem isolados, possibilitam o congelamento rápido do pescado imediatamente após ser processado. Em seguida, o produto embalado é embarcado em veículos refrigerados: caminhões, vagões ferroviários, navios ou aviões convenientemente isolados, o que lhe permite atingir os pontos de distribuição em perfeito estado de conservação. Nesses locais, o produto é novamente mantido em congeladores até que seja comercializado. Mesmo os consumidores últimos do produto, as donas de casa, dependem de seus refrigeradores ou congeladores domésticos, que também são isolados, para conservar os alimentos até que sejam consumidos, especialmente em um país quente como o Brasil.

É conveniente lembrar que as diversas funções dos sistemas isolantes, anteriormente relacionadas nos itens a) a g), podem ser reagrupadas ou qualificadas de maneira a torná-las mais facilmente identificáveis. Por exemplo, na indústria de transportes e mais especificamente no caso de navios, poderíamos reescrever aqueles itens da seguinte maneira:

- a) manutenção das temperaturas necessárias às conversões de energia na instalação propulsora;
- b) conservação da carga;
- c) conservação dos alimentos;
- d) manutenção das condições ambientais para conforto e proteção dos tripulantes;

Neste tipo de aplicações há duas situações básicas a considerar: sistemas de isolamento para altas temperaturas e sistemas de isolamento para baixas temperaturas. Cada uma dessas situações vai exigir do projetista, não apenas a seleção do material isolante propriamente dito cujas características mais se adaptem à faixa de temperatura de utilização, mas também uma criteriosa escolha dos demais elementos que compõem um sistema isolante.

Fundamentalmente, as aplicações dos sistemas de isolamento estão relacionadas com a manutenção de valores desejados de temperatura e com o controle do fluxo de calor, seja para permitir que uma instalação de máquinas opere de acordo com um determinado ciclo, seja para evitar a deterioração de produtos perecíveis, para impedir a explosão de cargas perigosas (incluindo munição de navios de guerra), a solidificação de emulsões, a vaporização de gases liquefeitos, queimaduras no pessoal, etc.

3.2 MANUTENÇÃO DA TEMPERATURA E CONTROLE DO FLUXO DE CALOR

Nas seções que se seguem, no entanto, procuraremos abordar o assunto da forma mais geral possível, evitando as limitações inerentes a aplicações específicas.

- g) conservação de energia e economia de recursos.
- f) proteção contra incêndio; e
- e) manutenção de condições adequadas ao funcionamento de equipamentos sensíveis;

Como existe sempre alguma umidade presente na maioria dos materiais isolantes, quando estes são colocados sobre uma superfície aquecida ocorre um aumento da pressão do vapor d'água em virtude do aumento de temperatura. O vapor, portanto, tende a migrar para a face externa do isolamento em contato com o ar ambiente em uma temperatura mais baixa. Em outras palavras, o contato com uma superfície aquecida tende a secar o material isolante, e a intensidade deste fenômeno depende das condições do ar circundante, que variam constantemente com a hora, o período do ano e as condições atmosféricas.

Nessas circunstâncias, se for empregado para proteger o isolamento um revestimento que proporcione uma vedação excessiva, impedindo a saída do vapor d'água com pressão mais elevada, como pode vir a ser o caso de um revestimento de chapas galvanizadas, por exemplo, acabará ocorrendo a condensação da umidade na superfície interna do material de revestimento, fazendo com que a própria chapa e os materiais de fixação de aço carbono, arames ou telas utilizadas para manter o isolante em posição, se oxidem rapidamente. Assim, no isolamento de superfícies a alta temperatura o material de revestimento deve proteger o material isolante contra o tempo e contra avarias mecânicas, mas não deve impedir que o vapor d'água o atravessasse e atinja o ar ambiente.

3.2.1 SISTEMAS ISOLANTES PARA ALTA TEMPERATURA

Quando o material isolante é aplicado sobre uma superfície que se encontra a uma temperatura inferior à ambiente, ocorre o inverso do que foi descrito para as superfícies aquecidas. Na regulação interna, adjacente à superfície do equipamento ou canalização, a pressão de vapor d'água será inferior àquela existente no ar ambiente, provocando a migração da umidade, sob a forma de vapor, de fora para dentro através do material isolante.

A medida que o vapor d'água atravessa o isolante, vai encontrando temperaturas cada vez mais baixas e, ao atingir o ponto de orvalho, ocorre a condensação. Isto faz com que parte do ar contido no isolamento seja substituído por água. Além disso, se a temperatura da superfície interna estiver a uma temperatura inferior a 0°C, haverá um ponto em que a água se solidificará, transformando-se em gelo. Com a continuação do processo, o material ficará cada vez mais cheio de água e gelo, perdendo a maior parte, ou mesmo a totalidade de sua capacidade isolante.

Para evitar a penetração do vapor d'água, reveste-se o material isolante aplicado sobre superfícies a baixa temperatura com um composto de vedação, conhecido como barreira de vapor, que deve recobrir inteiramente a superfície a ser protegida sem apresentar descontinuidades, uma vez que o vapor d'água aproveitará quaisquer falhas, rachaduras ou emendas para migrar através do material isolante na direção da superfície de temperatura mais baixa.

3.2.2 SISTEMAS ISOLANTES PARA BAIXA TEMPERATURA

Teoricamente, a condensação intersticial, que ocorre no inte

turas decrescentes. o vapor migra através do material isolante no sentido das tempera isolada, aumentando a possibilidade de condensação à medida que terna seja mais baixa do que a temperatura de uma superfície in lante inevitavelmente faz com que a temperatura da superfície in cie externa seja mais elevada do que seria sem ele, o sistema iso densação. Isto porque, ao fazer com que a temperatura da superfí ficial, ela contribui para agravar os fatores que provocam a con prescindir da isolamento térmica para impedir a condensação super ditório na isolamento de baixas temperaturas: embora não se possa em câmaras frigoríficas nos levam à constatação de um fato contra Estes comentários sobre a instalação de barreiras de vapor

pentinas de refrigeração. condensar nas superfícies mais frias, que geralmente são as na tenha a oportunidade de penetrar na câmara, onde ele irá se que o vapor sob pressão que consiga atravessar a barreira exter rapidamente a camada interna de isolante. Assim, deve-se permitir sagem da umidade, uma vez que o acúmulo de água e gelo destruiria por d'água, nunca se deve vedar a parede interna da câmara a pas ra de vapor é perfeita e sempre ocorre uma certa migração de vã ção no interior do isolante. Por outro lado, como nenhuma barreli biente que circunda a câmara, a fim de evitar que ocorra condensã responda a uma temperatura superior ao ponto de orvalho do ar am barreira de vapor deve ser colocada em um ponto da parede que cor No caso de câmaras frigoríficas com paredes de alvenaria, a

Em um navio a carga é a própria razão da sua existência e isto é válido tanto para navios mercantes, quanto para navios de guerra, cuja carga é o armamento transportado. Assim, não é mais enfatizar a importância da manutenção de temperaturas adequadas a conservação da carga e o papel desempenhados pelos sistemas isolantes. A esse respeito vale lembrar ainda que, às vezes, o que se deseja manter é a temperatura da própria carga, como é o caso de gases liquefeitos e de cargas frigorificadas. Outras vezes, o que se pretende é controlar o fluxo de calor proveniente de áreas adjacentes, a fim de impedir que as superfícies que con-

3.2.3 IMPORTÂNCIA DOS SISTEMAS ISOLANTES EM NAVIOS

Nos refrigeradores domésticos e nas frigoríficas de bordo não é necessário aplicar uma barreira de vapor, pois os contornos de chapa metálica oferecem uma resistência muito elevada à migração de vapor, podendo ser considerados impermeáveis na prática.

Nos refrigeradores domésticos e nas frigoríficas de bordo não é necessário aplicar uma barreira de vapor, pois os contornos de chapa metálica oferecem uma resistência muito elevada à migração de vapor, podendo ser considerados impermeáveis na prática.

Nos refrigeradores domésticos e nas frigoríficas de bordo não é necessário aplicar uma barreira de vapor, pois os contornos de chapa metálica oferecem uma resistência muito elevada à migração de vapor, podendo ser considerados impermeáveis na prática.

têm a carga atinjam temperaturas indesejáveis. Neste último caso se enquadram, por exemplo, os sistemas isolantes para os porões e os sistemas isolantes para anteparas de patóis de munição.

3.3 PROTEÇÃO DO PESSOAL

Os sistemas isolantes também são utilizados para proteger o pessoal de operação ou manutenção do contato com superfícies aquecidas de equipamentos e canalizações.

TABELA 3.1 - EMISSIVIDADE DE ALGUNS MATERIAIS COMUMENTE UTILIZADOS - REFERÊNCIA | 20 |

MATERIAL	EMISSIVIDADE (Absorptividade)	REFLETIVIDADE
Alumínio	0,02 - 0,05	0,95 - 0,98
Folha Polido	0,02 - 0,045	0,955 - 0,98
Tinta	0,40 - 0,65	0,35 - 0,60
Latão	0,06 - 0,07	0,93 - 0,94
Natural Polido	0,05	0,95
Cromo Polido	0,08	0,92
Cobre Polido	0,04	0,96
Oxidado (escuro) Esmalte, Branco	0,78	0,22
Ferro e Aço Polido	0,242	0,758
Enferujado	0,85	0,15

A temperatura de uma superfície está intimamente relacionada com sua emissividade (ϵ). Os materiais com superfícies muito refletoras, que têm baixa emissividade, como mostrado na tabela 3.1, apresentam temperatura superficial mais elevada quando envolvem equipamentos ou canalizações de alta temperatura, do que os materiais com superfícies pouco refletoras. Isto está mostrado na tabela 3.2, obtida para tubos de 101,6mm (4") de diâmetro, operando a 316°C (600°F) em um ambiente de ar parado e isolados com um material isolante usual para alta temperatura, ra, como o silicato de cálcio.

ESPESSURA DO ISOLANTE (mm)	EMISSIVIDADE (ϵ)		
	0,05	0,10	0,90
25	102,7	100,0	73,9
38	85,0	82,8	61,7
51	75,0	72,8	55,0
76	67,8	66,1	50,6

Tabela 3.2 - Variação da temperatura superficial (°C) com referência [11]

A explicação para este fato é simples. A troca de calor entre uma superfície sólida e o ar circundante se dá por convecção e radiação. Como vimos na expressão (2.23), a quantidade de calor cedida por radiação pela parede cilíndrica de uma canalização ao ar que a envolve varia diretamente com a emissividade do material da superfície externa. Um baixo valor de emissividade, portanto, constitui uma barreira adicional à troca de calor com o ambiente. Ora, se a quantidade de calor perdida for menor, menor será também a queda de temperatura. Com

Conseqüentemente, a temperatura superficial por si só não garante a segurança da superfície para o contato humano, devendo ser também levada em conta sua natureza ao se fixar a temperatura permitível na parte externa de canalizações e equipamentos que possam ser tocados pelo pessoal.

Outro fator a considerar na proteção ao pessoal é o fato de que, no contato da pele com superfície aquecidas de baixa condutibilidade térmica, que é o caso dos materiais isolantes, a transmissão de calor é relativamente lenta, permitindo à pele muitas vezes absorver e dissipar o calor sem que ocorram queimaduras ou a formação de bolhas. Já o contato com superfícies metálicas, que têm condutibilidade elevada, faz com que a temperatura da pele se eleve quase instantaneamente, provocando queimaduras e bolhas, que serão tanto mais sérias quanto maior for a temperatura.

seguintemente, a temperatura superficial de canalizações revestidas com materiais de baixa emissividade será mais elevada do que no caso de se ter um material na superfície externa com maior emissividade.

Uma das maneiras de empregar materiais isolantes na prevenção de incêndios é inteiramente análoga à que foi mencionada no item anterior para a proteção do pessoal, ou seja, a manutenção de baixas temperaturas superficiais a fim de evitar que materiais inflamáveis, que possam ser derramados ou de alguma forma entrar em contato com canalizações ou equipamentos aquecidos, sejam levados a entrar em combustão.

3.4 PROTEÇÃO CONTRA INCÊNDIO

3.4.1 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS EM RELAÇÃO AO FOGO

O comportamento dos materiais em relação ao fogo deve ser analisado de acordo com dois aspectos básicos:

a) reação ao fogo - que é a capacidade do material de contri-
buir para a alimentação e a propagação do fogo; e

b) resistência ao fogo - que é a capacidade do material de
manter durante um certo tempo suas características, e

consequentemente desempenhar as funções para as quais
foi projetado e das quais depende a segurança da instala-
ção. A esse respeito, é interessante ressaltar que não
existem materiais à prova de fogo, pois, submetido a uma
temperatura de chama suficientemente alta, por um tempo
suficientemente longo, qualquer material entrará em colap-
so. Portanto, a resistência ao fogo deve ser sempre rela-
cionada com a temperatura e com o tempo de exposição.

A reação ao fogo é condicionada pelas propriedades relativas à combustão, ao alastramento superficial e à propagação transversal das chamas, bem como aos mecanismos naturais de transmissão de calor. Além disso, particularmente em navios, deve-se considerar os produtos da combustão, fumaça e gases tóxicos, na análise dos materiais a serem empregados.

A resistência ao fogo de um material, por sua vez, pode ser definida por três requisitos:

- estabilidade estrutural, que é a capacidade de continuar suportando as cargas de projeto;

- estanqueidade, que é a capacidade de não apresentar fissuras ou aberturas que permitam a passagem das chamas e gases da combustão; e

- isolação térmica, que é a capacidade de continuar oferecendo resistência ao fluxo de calor, impedindo que a face não exposta atinja temperaturas que representem risco de ignição de outros materiais.

Essas três características, determinadas em laboratório simulando-se a ação do fogo por meio de um programa térmico padrão como definido no capítulo IV: MATERIAIS PARA ISOLAÇÃO TÉRMICA, são expressas em função do tempo em que permanecem dentro de limites estabelecidos, estando o material exposto ao fogo.

Outros fatores influenciam a capacidade de um material resistir à ação do fogo e um deles é a quantidade de umidade que o material contém. Materiais que contêm uma grande quantidade de

água de cristalização, quando aquecidos em um incêndio permanecem por um tempo relativamente longo a 100°C até que toda a água tenha evaporado, e este período de secagem representa um valioso elemento de proteção contra o fogo.

3.4.2 DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A progressão do aumento de temperatura ao longo das diversas camadas que compõem a espessura de um material isolante, além de depender da quantidade de calor que flui através do material, que é proporcional à condutibilidade térmica (k) e ao gradiente de temperatura, depende também da capacidade de cada camada armazenar calor, que é função do calor específico (c) e da densidade (ρ) do material.

A condutibilidade térmica, o calor específico e a densidade podem ser combinadas na difusividade térmica (α), que também é uma característica do material:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad \text{m}^2/\text{s}$$

A progressão do aumento de temperatura é proporcional à difusividade térmica, e é evidente que materiais mais densos, com calor específico elevado e baixa condutibilidade térmica retardarão por mais tempo o aumento de temperatura da face não exposta ao fogo.

É importante ressaltar, no entanto, que os materiais isolantes

Como já mencionado anteriormente, o uso de sistemas de isolação adequados é considerado como uma das medidas mais simples e

Grandes parte da energia que utilizamos hoje em dia para movimentar a indústria e os transportes provem de fontes primárias não-renováveis: o petróleo, o carvão, o gás natural. Este fato, aliado aos expressivos investimentos necessários para o aproveitamento das fontes renováveis de energia, quando elas existem, tem levado o mundo industrializado a repensar com profunda seriedade as maneiras de utilizar a energia disponível e evitar os desperdícios a todo custo.

Energia custa dinheiro e este custo tem influência vital na viabilidade econômica de navios mercantes e na eficiência de navios de guerra, especialmente quando se considera a possibilidade de utilização frequente destes para atingir o adiestramento necessário em tempo de paz. Além disso, a eficiência na conversão da energia representada pelo poder calorífico do combustível é decisiva para a determinação do raio de ação das embarcações.

3.5.1 A IMPORTÂNCIA DE CONSERVAR ENERGIA

3.5 CONSERVAÇÃO DA ENERGIA E ECONOMIA DE RECURSOS

tes podem ser usados como retardadores, mas o seu emprego não deve excluir os equipamentos e instalações de combate a incêndio previstos em lei ou ditados pelo bom senso.

mais eficazes para se atingir o duplo objetivo de conservar a energia disponível e economizar os recursos dispendidos. A esse respeito, transcrevemos um trecho do prefácio da norma britânica da referência |21|:

"Observe-se que as espessuras recomendadas nas tabelas para conservação de calor são apreciavelmente maiores do que as que apareciam nas normas anteriores. Isto se deve à urgente necessidade de economizar as reservas de energia ...".

A grande vantagem de se utilizar sistemas de isolamento para conservar energia é que eles têm que ser instalados de qualquer maneira, por diversas outras razões, como as que acabamos de enumerar nos itens precedentes.

3.5.2 REDUÇÃO DAS PERDAS DE CALOR

As figuras 3.1 a 3.4, calculadas utilizando-se as fórmulas apresentadas no capítulo V: PROJETO DE SISTEMAS ISOLANTES para diversas espessuras de calhas isolantes de silicato de cálcio (livre de amianto), ar ambiente a 20°C e convecção natural, mostram a ponderável quantidade de energia térmica economizada mediante o emprego de isolantes térmicos em canalizações e equipamentos.

Verifica-se que aumentando progressivamente a espessura do isolante reduz-se a perda de calor e, conseqüentemente, a quantidade de combustível necessária para manter a temperatura de operação. Este fato, se por um lado reduz a despesa na conversão de

Fig. 3.2 - Perda de calor em tubos com temperatura superficial de 150°C - Referência |10|

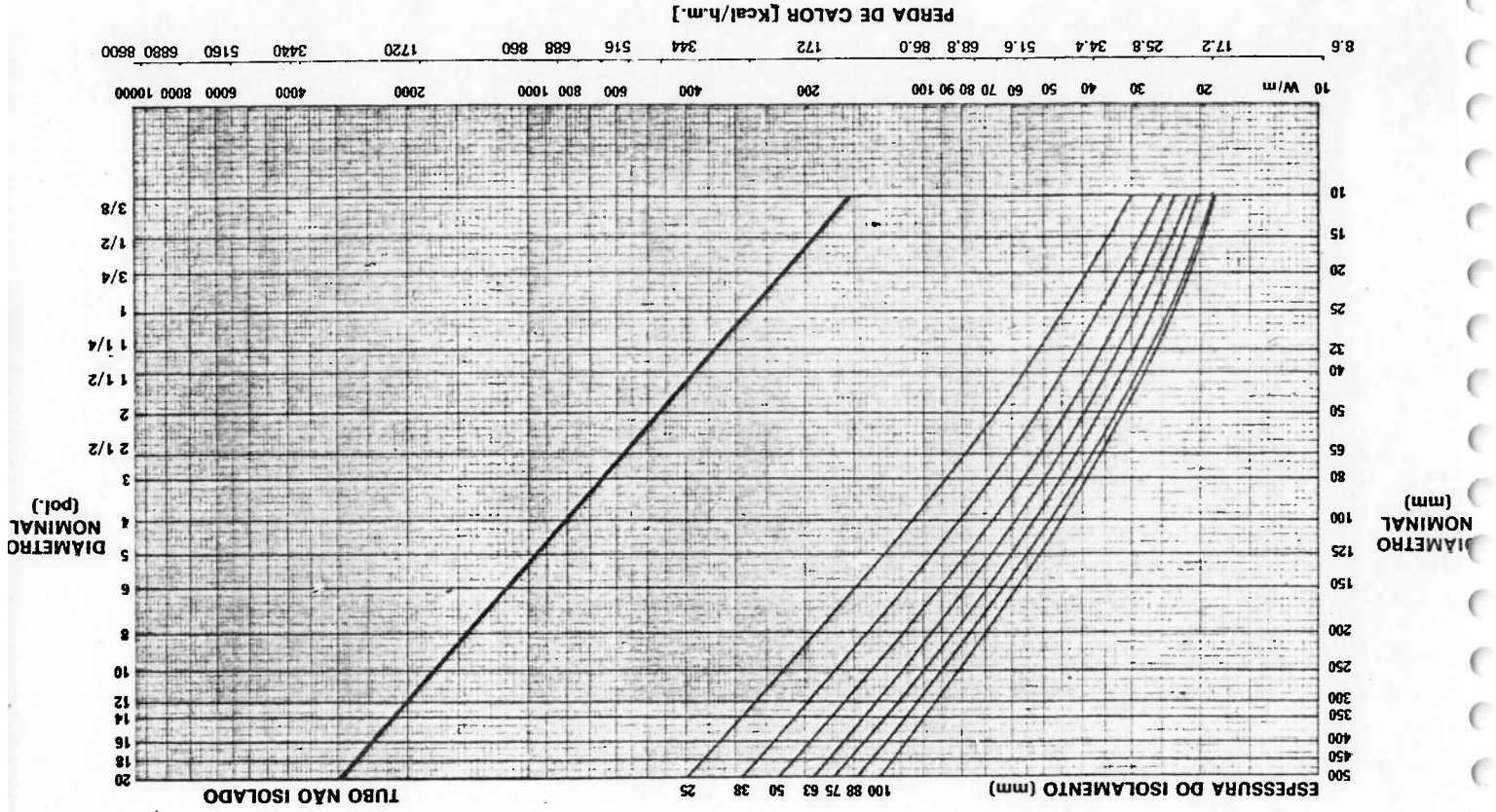


Fig. 3.1 - Perda de calor em tubos com temperatura superficial de 75°C - Referência |10|

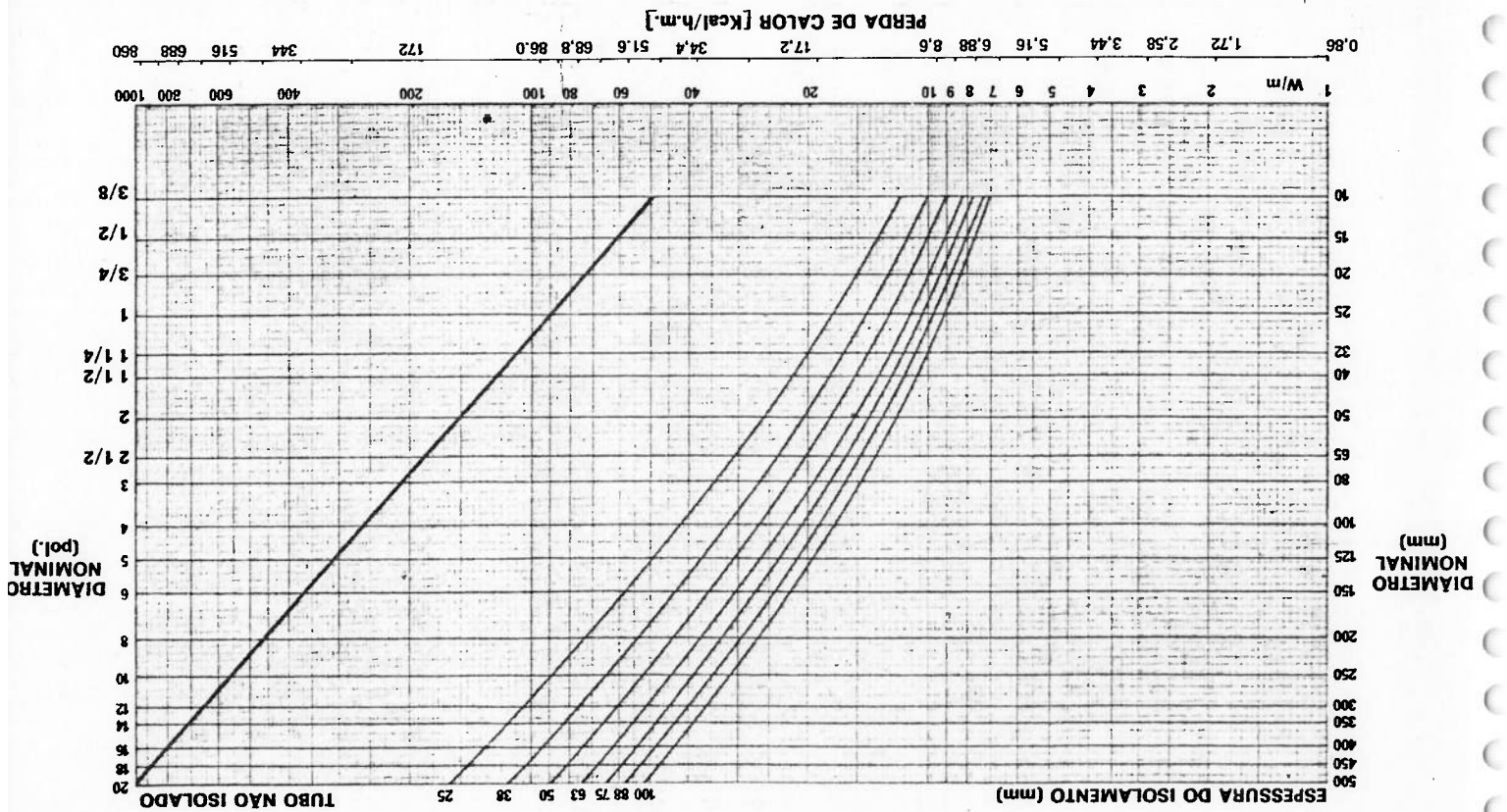


Fig. 3.4 - Perda de calor em tubos com temperatura superficial de 600°C - Referência |10|

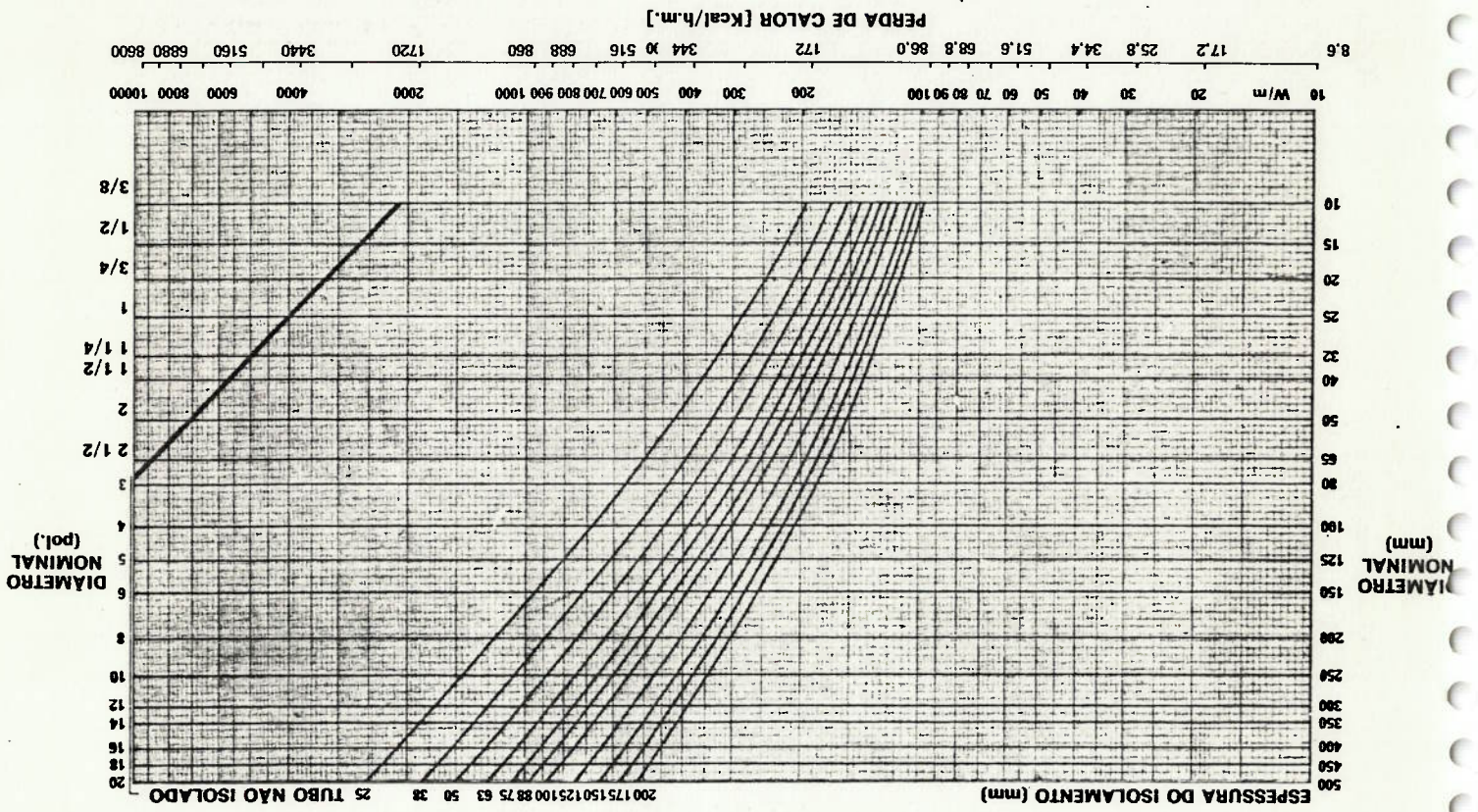
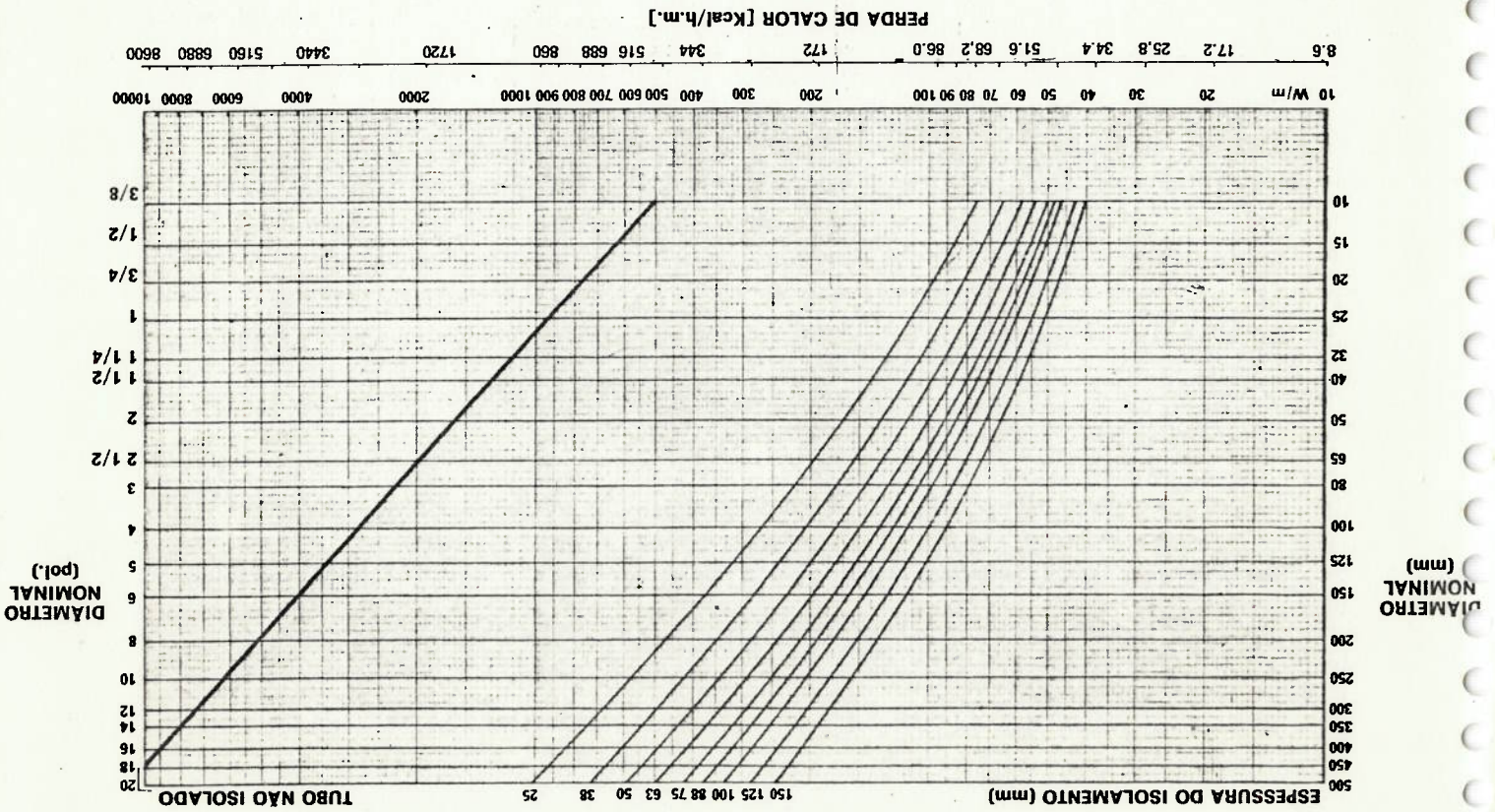


Fig. 3.3 - Perda de calor em tubos com temperatura superficial de 300°C - Referência |10|



energia, por outro introduz um fator novo no balanço de custos: o custo do sistema isolante. Além disso, deve-se ter em mente que o acréscimo sucessivo de camadas isolantes não representa uma redução proporcional no calor perdido.

Para cada camada de isolante acrescentada, podemos definir a eficiência do sistema isolante como sendo:

$$\text{Eficiência} = \frac{q_0}{q_0 - q} = \frac{\text{Perdas sem isolante}}{\text{Perdas sem isolante - Perdas com isolante}}$$

A tabela 3.3, elaborada a partir da figura 3.3, demonstra a vantagem relativa de se adicionar progressivamente material isolante a uma canalização de 65mm, que opera a 300°C em um ambiente de ar calmo a 20°C.

Δx	(pol.) (mm)	q	(W/m)	$q_0 - q$	Eficiência (%)	Acrescimento (%)
0	0	2.000		-	-	-
1	25	200		1.800	90,00	90,00
2	50	130		1.870	93,50	3,50
3	75	105		1.895	94,75	1,25
4	100	90		1.910	95,50	0,75

TABELA 3.3 - EFICIÊNCIA DO SISTEMA ISOLANTE

O exame da tabela 3.3 chama de imediato a atenção para a importância de não se deixar canalizações aquecidas expostas, pois uma simples camada isolante de 25mm (1 pol.) já proporciona, nesse caso, uma redução de 90% nas perdas de energia ao longo da canalização.

Duas outras conclusões importantes podem ser tiradas da análise dos dados da tabela 3.3. Em primeiro lugar, que o crescimento de eficiência é decrescente para cada camada adicionada. Em segundo lugar, que, por maior que seja a espessura utilizada, sempre haverá, mesmo que ínfima, uma certa perda de energia.

A toda quantidade de energia perdida pode ser atribuído um custo. Por outro lado, os sistemas isolantes empregados para reduzir as perdas térmicas também têm seu custo. Em cada caso, portanto, o custo total terá dois componentes: o custo da inevitável perda de energia, que decresce com o aumento da espessura do isolante, e o custo do próprio sistema isolante, que aumenta com a espessura. A figura 3.5 ilustra esta composição de custos de maneira esquemática.

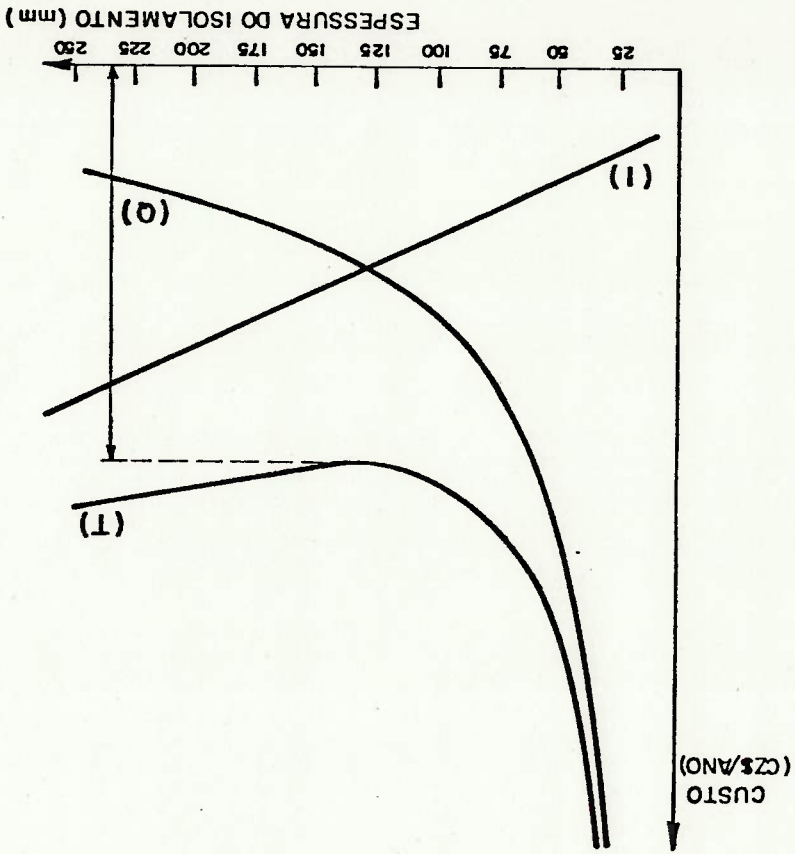


Fig. 3.5 - Composição gráfica de custos

Tradicionalmente, costuma-se levar em conta para o levantamento da curva (Q), representativa do custo das perdas de energia, os seguintes fatores:

- custo da energia (custo do combustível e eficiência de utilização);
- investimento de capital no equipamento gerador de calor e na distribuição da energia até o ponto de utilização;
- custo do dinheiro para o investimento de capital (juros + comissões);
- período de depreciação;
- manutenção; e
- número de horas de operação por ano.

Da mesma forma, ao se levantar o custo anual do sistema isolante por unidade de espessura, curva (I), deve-se levar em conta fatores semelhantes:

- investimento de capital no sistema isolante instalado;
- custo do dinheiro;
- período de depreciação; e
- custo de manutenção.

O custo total por ano, tal como representado pela curva (T), corresponde à soma dos custos anuais das perdas de energia e do sistema isolante. As curvas de custo total apresentam um ponto de mínimo, a chamada "espessura econômica" para o sistema isolante empregado.

3.5.3 CÁLCULO DA ESPESSURA ECONÔMICA

Diversos métodos têm sido propostos para o cálculo da "espesura econômica" de sistemas isolantes. A seguir são abordados dois deles que, respectivamente por seu pioneirismo e por seu aspecto inovador, merecem destaque especial. Alguns outros serão apenas citados, mencionando-se a referência onde podem ser examinados.

3.5.3.1 O Método de McMillan

Foi T.B. McMILLAN [22] que, pela primeira vez, apresentou uma formulação para o cálculo da "espesura econômica" com base na composição dos custos das perdas de calor e do sistema de isolamento. A dedução de suas expressões para superfícies planas e cilíndricas, citadas ou transcritas muitas vezes em trabalhos posteriores, foram adaptadas neste trabalho para unidades métricas e para uma simbologia mais de acordo com o nosso uso.

Levando-se em conta as formulações apresentadas no capítulo V: PROJETO DE SISTEMAS ISOLANTES, suponhamos que o custo anual das perdas de calor por unidade de área seja:

$$m = Y \cdot \left(T_a - T_o \right) \cdot \left(\frac{1000}{M} \right) = \frac{1000 R}{Y \cdot \Delta T \cdot M} \left(\frac{k}{\sqrt{x}} + \frac{1}{h} \right) \text{ em } \$ / m^2 \cdot \text{ano}$$

onde:

Y é o número de horas de operação/ano;

T_o é a temperatura da superfície interna do isolamento;

T_a é a temperatura ambiente;

M é o custo do KW-h;

h_c é o coeficiente combinado de película;

k é a condutibilidade térmica do isolante;

Δx é a espessura do isolante; e

R é a resistência térmica.

Suponhamos, por outro lado, que o custo do sistema isolante

seja expresso por:

$$n = b \cdot \Delta x + c \quad \text{em } \$/m^2 \cdot \text{ano,}$$

onde:

b é o custo do sistema instalado por m^2 , por unidade de

espessura do isolante, por ano; e

c é a constante correspondente aos custos fixos.

O custo total $Y = m+n$, será:

$$Y = \frac{Y \cdot \Delta T \cdot M}{1000 R} + b \cdot \Delta x + c \quad \text{em } \$/m^2 \cdot \text{ano}$$

A condição necessária de mínimo para a função $Y=f(t)$ é que a

primeira derivada $dy/d(\Delta x)$ seja nula. Calculando a derivada tem

se:

$$\frac{dy}{d(\Delta x)} = \frac{1000}{Y \cdot \Delta T \cdot M} \cdot \left(-\frac{1}{R^2} \right) \frac{d(\Delta x)}{dR} + b$$

Como

$$R = \frac{1}{\Delta x} + \frac{k}{h_c}$$

então:

$$\frac{dR}{d(\Delta x)} = \frac{1}{k}$$

Logo

$$\frac{dy}{d(\Delta x)} = b - \frac{1000}{Y \cdot \Delta T \cdot M} \cdot \frac{(\Delta x + \frac{h_c}{k})}{k}$$

Aplicando a condição necessária de mínimo resulta:

$$\frac{k}{Y \cdot \Delta T \cdot M} = \frac{h_c}{k} + \frac{1000}{b}$$

portanto:

$$\Delta x = \left(\frac{Y \cdot \Delta T \cdot M \cdot k}{1000 b} \right)^{1/2} - \frac{h_c}{k}$$

Analogamente, para superfícies cilíndricas pode-se supor

que o custo das perdas de energia seja dado por:

$$m' = Y \cdot \left[\frac{2\pi (T_o - T_a)}{\frac{1}{k} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) + \frac{1}{r_2 h_c}} \right] \cdot \frac{1000}{M} = \frac{1000}{Y \cdot \Delta T \cdot M \cdot U} \text{ em } \$ / m^2 \cdot \text{ano}$$

Na prática, embora sejam comumente citadas e constem de todos os manuais de isolamento térmica, as fórmulas de McMILLAN, bem como outras análogas apresentadas nas referências |21|, |23|, |24| e |25|, não são frequentemente usadas. O motivo, talvez, seja o fato de que a sua utilização, para fazer sentido, exige um conhecimento preciso dos custos envolvidos. Ora, nem sempre é fácil determinar esses custos com a precisão exigida. Tanto mais que isto envolve a capacidade de fazer projeções, como, por exemplo, aquela necessária para se prever a variação do custo da energia ao longo do período de depreciação considerado.

Resolvendo-se esta equação, pode-se chegar ao valor de r_2 e, conseqüentemente, à "espessura econômica = $(r_2 - r_1)$ ".

$$\left(\frac{k \cdot Y \cdot \Delta T \cdot M}{1000 b} \right)^{1/2} = \left(\frac{2r_2 - r_1}{k} \right)^{1/2} \cdot (r_2 \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{h_c}{k})$$

Da mesma forma que para as superfícies planas, compo-se os custos e em seguida obtendo-se o valor mínimo, chega-se a:

$$n' = 2\pi r_2 (r_2 - r_1) b + c \quad \text{em } \$/\text{m} \cdot \text{ano}$$

O custo do sistema isolante instalado será dado por:

r_2 é o raio externo do isolamento.

r_1 é o raio interno do isolante; e

$u = 1/R$ é a condutância térmica;

onde:

As figuras 3.6(a) e (b), retiradas da referência [26] e baseadas nas estruturas de preços vigentes em janeiro de 1973 e fevereiro de 1978, constituem um exemplo de utilização prática pela PETROBRAS do método de composição de custos descritos. Convém notar, no entanto, que se trata da maior empresa do País, atuando no ramo da produção de combustíveis e, portanto, reunindo todas as condições para a determinação precisa de custos anteriormente mencionada.

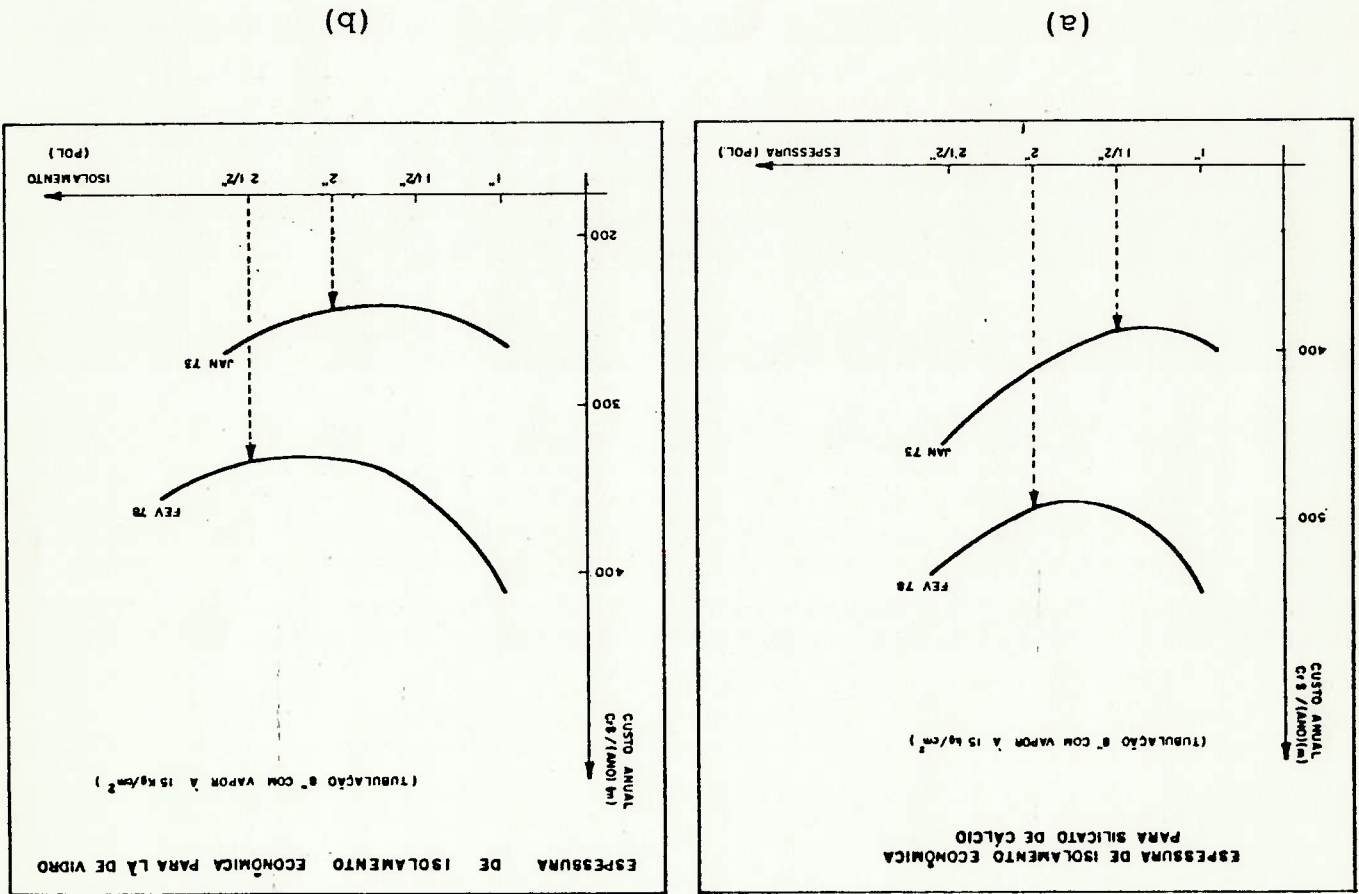


Fig. 3.6 - Evolução da espessura econômica para dois materiais isolantes. Referência [26]

3.5.3.2 O Método de Harris

Recentemente, PETER HARRIS, Diretor de Serviços da Associação de Utilizadores de Energia do Reino Unido, [27] sugeriu um método que não é tão sensível as hipóteses feitas, principalmente para o levantamento da curva representativa do custo com as perdas de energia (Q).

HARRIS inicia por lembrar que, embora a curva de custo do sistema isolante seja usualmente representada por uma reta nos métodos tradicionais, na realidade ela é uma linha poligonal, conforme mostrado na figura 3.7, e isto porque, em primeiro lugar, os fabricantes só produzem materiais isolantes em espessuras discretas: 25mm (1"), 50mm (2"), etc. Assim, mesmo que os cálculos indiquem uma espessura de, por exemplo, 70mm, somos forçados a adquirir um isolante com 75mm (3"). Em segundo lugar, os fabricantes e empreiteiros geralmente não cobram segundo uma escala contínua, mas segundo uma linha quebrada ascendente.

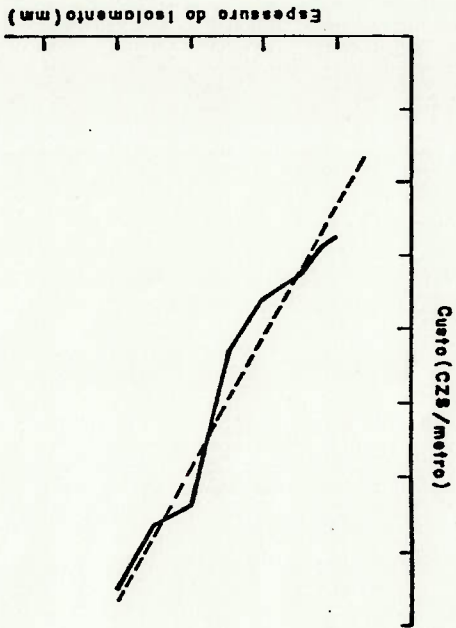


Fig. 3.7 - Custo real do sistema isolante para um dado diâmetro de canalização. Referência [27]

Estes fatos são importantes para o cálculo da espessura econômica. O mínimo, como se sabe, ocorre quando a curva do custo das perdas de energia e a curva do custo do sistema isolante possuem inclinações idênticas e de sinal contrário. Ora se a curva (I) for uma reta, sua inclinação não variará e a "espessura econômica" será o resultado da variação progressiva da inclinação da curva (Q) até o valor correspondente a esta inclinação constante. Assim, o que se obtém é um mínimo pouco definido, cujo valor depende muito das hipóteses admitidas no cálculo dos custos das perdas de energia.

Se a curva (I), no entanto, for poligonal e mudar abruptamente de inclinação a cada trecho, haverá um ponto preciso em que sua inclinação corresponderá a uma determinada inclinação da curva (Q), formando um mínimo bem definido. Além disso, HARRIS verifica que o mínimo assim determinado não é sensível às hipóteses embutidas na curva (Q). Isto está mostrado na figura 3.8 onde, embora se considere períodos diferentes de avaliação de combustão, isto é, os períodos em que se computa o gasto com combustível, o mínimo permanece sempre na mesma espessura. O mesmo resultado seria obtido, acrescenta, se o período de avaliação fosse mantido constante e o custo do combustível aumentado duas ou três vezes, ou se a temperatura de operação fosse aumentada mantendo-se os outros parâmetros constantes.

O aspecto mais interessante deste método, segundo HARRIS, é que nem é necessário traçar a curva (Q), a despeito de qual seja o período de avaliação ou o custo do combustível. Tudo o que

se tem a fazer é obter as cotações dos empreiteiros, construir a curva correspondente, procurar o trecho mais inclinado e escolher a espessura correspondente ao ponto inferior deste trecho. Esta será a "espessura econômica" procurada.

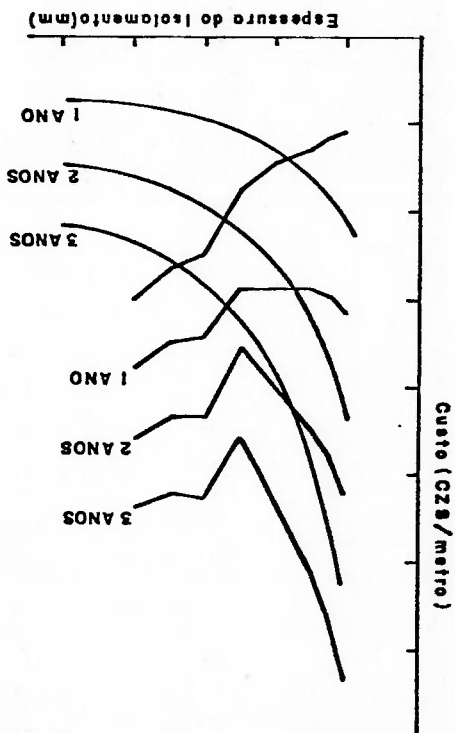


Fig.3.8 - Espessura econômica com base nos custos dos fabricantes e empreiteiros - Referência | 27 |

Apesar de expor suas idéias de forma atraente, HARRIS não

chega a apresentar em seu trabalho dados que comprovem o seu interessante raciocínio. Assim, seria necessário um trabalho adicional, que contivesse dados levantados no mercado brasileiro de fornecimento e instalação de sistemas isolantes (o que nem sempre é fácil para o pesquisador obter, pois se trata muitas vezes de séculos de concorrência muito bem guardados) para que se possa concluir da aplicabilidade ou não do método de HARRIS, pelo menos ao nosso caso.

3.5.3.3 Exigências técnicas

É importante lembrar, que a discussão precedente sobre a de

terminação da "espessura econômica" parte do pressuposto de que

estejam sendo atendidos os requisitos técnicos que norteiam o pro

jeito do sistema isolante. Ora, a necessidade de satisfazer certos

requisitos pode excluir as considerações sobre uma "espessura eco

nômica" tal como discutida nos parágrafos anteriores. Assim, por

sua própria natureza, as exigências técnicas devem ter precedên-

cia sobre outras considerações, particularmente quando o sistema

isolante esteja sendo projetado para cumprir uma das seguintes fi

nalidades (*):

a) manter a substância de trabalho dentro de limites especí

ficos de temperatura. Por exemplo, nas instalações de re

frigeração, ou em sistemas que contenham fluidos com bai

xo ponto de congelamento;

b) garantir que o fluido em uma canalização possua proprieda

des físicas específicas no ponto de utilização;

c) evitar riscos para o pessoal. Por exemplo, aqueles ofere

cidos por componentes da instalação a baixa temperatura,

ou que contenham fluidos com baixo potencial energético,

como drenagens e condutos de descargas de gases;

d) controlar os deslocamentos de origem térmica de elemen-

tos da instalação, especialmente aqueles expostos a tempê

raturas elevadas;

(*) É óbvio, no entanto, que o sistema isolante deverá ser o mais econômico que satisfaça todas as exigências técnicas, ao longo da vida útil prevista.

Finalmente, sem esquecer o forte apelo prático representado por um menor custo inicial do sistema isolante, não é demais lembrar que a redução ao máximo possível das perdas de energia tem hoje um sentido estratégico muito mais importantes do que em 1926, quando McMILLAN apresentou suas ideias sobre a "espessura econômica" pela primeira vez.

h) melhorar as condições de conforto ambiental.

de óleo pesado; e

condensação de produtos ácidos resultantes da combustão que corrosivo, que pode ser provocado, por exemplo, pela da instalação acima de um valor mínimo, para impedir atã

g) manter a temperatura interna de determinados componentes

isolamento de instalações a baixa temperatura;

f) evitar a condensação de umidade na superfície externa do

fim de evitar danos causados por excessos de temperatura;

e) limitar a temperatura de certas partes da instalação, a

c) materiais de vedação - são os compostos aplicados ao re-
primamente dito;

b) materiais de revestimento - constituem a cobertura ou
capa protetora colocada sobre o material isolante pro-
pregados para resistir ao fluxo de calor;

a) materiais isolantes - definidos como aqueles que são em

sicamente, classificados em quatro categorias:

Os materiais utilizados para isolamento térmica podem ser, bá

sitos técnicos que se deseja atender.

as propriedades que cada material deve possuir em face dos requi-

tipos existentes de interesse industrial. Em seguida, aborda-se

Para cada categoria, faz-se inicialmente uma descrição dos

constituem os sistemas isolantes.

capítulo, portanto, trata da natureza daqueles materiais que

Em engenharia, conhecer os materiais é indispensável. Este

MATERIAIS PARA ISOLAÇÃO TÉRMICA

(Sabedoria popular)

pre razão.

O material tem sem

CAPÍTULO IV

No primeiro tipo, os materiais isolantes são compostos por pequenas partículas ou flocos, que podem ser ou não ligados entre si. A vermiculita, que é um mineral constituído principalmente de silicatos hidratados de alumínio e magnésio, após ser beneficiada constitui um exemplo típico de isolante térmico composto

- Flocos,
- Fibras,
- Grãos,
- Células, ou
- Materiais refletivos.

tura seja composta de:

Existem uma ampla variedade de materiais empregados como isolantes térmicos, que podem ser obtidos de um número razoavelmente grande de fabricantes. Todavia, como as características dos isolantes são fundamentalmente determinadas por sua composição, podemos dividi-los em cinco tipos principais, conforme sua estrutura

4.1.1 TIPOS

4.1 MATERIAIS ISOLANTES

Para prender o material isolante à superfície a ser isolada, bem como o revestimento ao isolante.

d) materiais de fixação - são os diversos itens utilizados para prender o material isolante à superfície a ser isolada;

vestimento para impedir que fluidos - líquidos ou gases - atravessem o revestimento e penetrem no material isolante;

de flocos.

Os isolantes térmicos do segundo tipo são compostos por fibras de pequeno diâmetro, que podem ser orgânicas ou inorgânicas, ligadas ou não entre si. A madeira e o pelo animal constam exemplos de fibras orgânicas, enquanto que as fibras inorgânicas podem ser de vidro, lá de rocha, lá de escória, cerâmica, etc.

Os materiais isolantes granulares são compostos de pequenos nódulos que contêm espaços vazios. Distinguem-se dos materiais celulares pela possibilidade de haver transferência de gases entre os espaços individuais. São exemplos deste tipo o silicato de cálcio, a terra diatomácea, o carbonato de magnésio e a cortiça vegetal.

Os materiais isolantes celulares são compostos por células individuais inteiramente estanques entre si. Podem ser obtidos a partir do vidro, borracha ou plásticos.

Os materiais isolantes refletivos são compostos por folhas ou chapas finas de materiais de elevada refletividade térmica, convenientemente separadas por espaçadores de baixa condutibilidade térmica e pequena seção transversal para reduzir a transmissão de calor por condução. O espaçamento existente entre as chapas é projetado de maneira a proporcionar espaços restritos de ar, diminuindo a transmissão de calor por convecção.

É interessante observar que os quatro primeiros tipos de

materiais costumam ser chamados de isolantes de massa, uma vez que sua ação isolante se caracteriza pela interposição de uma determinada massa de material entre as superfícies que se deseja isolar, massa essa que, em virtude de sua elevada resistência térmica, constitui uma barreira eficaz à transmissão de calor. Já os materiais refletivos têm sua ação isolante caracterizada pela refletividade das superfícies limites e pelo adequado arranjo dos espaços de ar internos, não sendo materiais isolantes propriamente ditos, mas sim sistemas de isolamento. Além disso, deve-se lembrar que os materiais isolantes disponíveis muitas vezes representam combinações dos tipos básicos enumerados anteriormente. Assim, materiais fibrosos podem ser adicionados a materiais granulares a fim de aumentar a resistência do produto, ou se pode utilizar fibras para separar placas refletivas, por exemplo.

4.1.2 FORMAS

Os materiais isolantes costumam ser fornecidos comercialmente nas seguintes formas:

- blocos rígidos;
- placas e painéis rígidos, semi-rígidos e flexíveis;
- tubos, tubos bi-partidos, calhas e segmentos curvos rígidos, semi-rígidos e flexíveis;
- feltros (revestidos, ensacados);
- mantas (revestidas com tela metálica);
- dutos pré-moldados;
- flocos;
- cordões e tiras;

A colocação desta propriedade em primeiro lugar tem como objetivo chamar a atenção para a importância de se utilizar cada ma

Como o tempo de exposição e o número de trocas de temperatura afetam alguns materiais, muitas vezes é importante especificar os limites de temperatura para exposição contínua, intermitente ou cíclica.

A faixa de temperatura de aplicação é determinada pelos limites inferior e superior de temperatura a que se pode expor o material, sem que este experimente alterações sensíveis em suas outras propriedades. Dentro desses limites o material isolante não deve degenerar mecânica, térmica ou quimicamente.

4.1.3.1 Faixa de Temperatura de Aplicação

4.1.3 PROPRIEDADES

O grande número de tipos e formas com que são fornecidos os materiais isolantes permite ao utilizador selecionar materiais cujo preço e propriedades variam grandemente, o que é desejável, uma vez que os requisitos de cada projeto também variam amplamente. Assim, a correta verificação das propriedades dos diversos materiais isolantes é de grande importância para a instalação, a vida útil e a eficiência térmica do sistema de isolamento selecionado, e a possibilidade de optar entre diversos materiais permite obter sistemas isolantes com elevada razão benefício/custo.

- isolamento projetado;
- formas especiais (luvas, módulos, etc.).

terial isolante dentro de sua faixa adequada de temperaturas. A utilização fora desses limites pode danificar irreversivelmente o material, ou alterar de forma irremediável suas outras propriedades relacionadas a seguir, tornando o sistema isolante totalmente ineficaz.

A tabela 4.1 apresenta, para diversos materiais isolantes típicos, as temperaturas máximas a que podem ser submetidos em operação sem que sejam danificados.

Para os materiais empregados em baixas temperaturas (abaixo de 10°C), deve-se igualmente levar em conta a temperatura mínima de operação. De qualquer maneira, como a composição de cada material depende em última análise do fabricante, este deve ser sempre consultado sobre os limites de temperatura aceitáveis para seus produtos.

A faixa de temperaturas de operação está intimamente relacionada com a estabilidade dimensional em serviço, ou seja, com a capacidade de o material reter suas dimensões e forma após ser exposto às condições de trabalho (calor, umidade, etc.) em que deve desempenhar o seu papel dentro do sistema isolante.

Para os materiais destinados as aplicações de baixa temperatura, deve-se ter especial atenção com a possibilidade de uma contração excessiva; com a tendência a fragilização provocada pelo frio, o que torna o material quebradiço e propenso a desagregar; com o excesso de porosidade; e com a capacidade de resistir a um eventual aquecimento do sistema isolado necessário para

MATERIAL	FORMA	TIPO	°C
Alumínio	Folha Plana/ Corrugada	Refletivo	500
Lã de Vidro	Placas aglutinadas com resina	Fibras	230 a 510 (*)
	Calhas	Fibras	230 a 510 (*)
	Mantas	Fibras	510
Lã de Rocha	Placas aglutinadas com resina	Fibras	260 a 760 (*)
	Calhas	Fibras	260 a 700 (*)
	Mantas	Fibras	570 a 760
Silicato de Cálcio	Placas	Grãos	650 a 1010
	Calhas	Grãos	650 a 760
Espuma Rígida de Poliuretano	Placas, calhas, projetado	Células	100
Poliestireno Expandido	Placas, calhas	Células	150
Cortiça	Placas, calhas	Células	60

(*) Acima de 260°C a resistência à compressão pode decrescer consideravelmente devido à volatilização do aglutinante.

Tabela 4.1 - Temperatura máxima aproximada de operação para alguns materiais isolantes típicos - Referência | 28 |

Já nas aplicações de alta temperatura, os fatores que podem provocar deterioração em serviço incluem a contração linear provocada pela secagem, a perda de resistência à compressão e de peso durante o aquecimento, os efeitos combinados da vibração e do calor e a possibilidade de ocorrência de reações exotérmicas no interior do sistema isolante provocadas pelo aumento da temperatura.

Outros metais, como a platina e o urânio, por exemplo, pos-

Os metais bons condutores de electricidade são ricos em elétrons livres, cujas migrações prontamente redistribuem os níveis de energia. Consequentemente, a condutibilidade térmica está relacionada com a elétrica, que decresce com o aumento da temperatura. Em temperaturas elevadas, no entanto, a condutibilidade térmica se torna quase constante, exceto para o ferro.

De uma maneira geral, os materiais podem ser subdivididos em três grupos no que diz respeito à condutibilidade térmica: metais e suas ligas, sólidos não metálicos e fluidos estacionários.

4.1.3.2.1 Grupos de Materiais

Os valores de condutibilidade térmica dos materiais variam amplamente, desde valores bastante elevados para um excelente condutor como a prata, até valores pequenos para um mau condutor como o ar parado, ou menores ainda para pós muito finos, onde as dimensões das células de ar aprisionadas no interior do material se aproximam da trajetória livre média das moléculas.

A condutibilidade térmica é uma propriedade muito importante de um corpo ou meio e indica a capacidade de transmitir calor. Quanto maior o seu valor, tanto melhor condutor de calor é o material.

4.1.3.2 Condutibilidade Térmica

suem apenas uma quantidade limitada de elétrons livres e tendem a apresentar valores menores de condutibilidade térmica. A transmissão direta de energia vibratória através da bem ordenada estrutura cristalina, no entanto, se torna mais significativa, fazendo com que o valor da condutibilidade aumente com a temperatura, ao invés de decrescer como no grupo anterior, em que predomina a redistribuição de energia feita pelos elétrons livres. A tabela 4.2 apresenta valores de condutibilidade térmica, para diferentes temperaturas, de diversos metais.

METAL	IMPUREZAS (%)	CONDUTIBILIDADE (k) EM W/m.°C			
		-50°C	0°C	200°C	400°C
Alumínio	0,3	231,82	228,36	226,63	226,63
	1,0	200,68	198,95	197,22	-
Cobre	0,1	-	380,60	371,95	363,30
Ferro	0,1	-	74,39	62,28	48,44
Chumbo	0,0	38,06	36,33	32,87	-
Níquel	0,1	-	60,55	72,66	58,82
	1,0	58,82	58,82	58,82	58,82
Platina	0,05	70,93	69,20	72,66	77,85
Prata	0,0	420,39	418,66	-	-
	0,1	408,28	403,09	375,41	352,92
Zinco	0,2	115,91	114,18	107,26	93,42
					-

Tabela 4.2 - condutibilidade térmica de alguns metais - Referência [13]

A condutibilidade térmica das ligas metálicas não pode ser estimada diretamente através de uma "ponderação" das condutibilidades dos elementos constituintes. A condutibilidade das ligas é, em geral, significativamente menor do que aquela dos seus principais constituintes, uma vez que, mesmo em pequenas quantidades,

a presença de uma outra substância no interior de uma estrutura cristalina restringe a mobilidade dos elétrons livres. A título de exemplo, o monel, que é uma liga de 67% de níquel, $k = 72,66$ W/m. $^{\circ}$ K a 200 $^{\circ}$ C, e 29% de cobre, $k = 371,95$ W/m. $^{\circ}$ K a 200 $^{\circ}$ C, tem \bar{n} ma condutibilidade térmica de 34,60 W/m. $^{\circ}$ K a 200 $^{\circ}$ C.

A condutibilidade térmica dos aços, exceto aqueles com alto teor de cromo, decresce com a temperatura, enquanto que a condutibilidade térmica das ligas não-ferrosas aumenta. Além disso, o tratamento térmico de uma liga metálica altera o valor de sua condutibilidade térmica.

Os sólidos não metálicos não possuem elétrons livres e, portanto, têm condutibilidade térmica menor do que a dos metais. Podem ser ainda subdivididos em:

i) materiais porosos, como o tijolo (cerca de 95% do volume é ar), a cortiça, a madeira e o couro, que são frequentemente utilizados como isolantes térmicos. A baixa condutibilidade desses materiais é em grande parte devido à existência de ar aprisionado em cavidades muito pequenas para permitir que ocorra uma convecção significativa térmica. Para esses materiais, a condutibilidade térmica depende grandemente do teor de umidade ($k_{H_2O} \approx 25 k_{ar}$).

ii) materiais não porosos, que não são sensíveis à umidade e frequentemente são utilizados como isolantes elétricos. Podem ter:

- estrutura cristalina, cuja condutibilidade diminui com a temperatura; ou

- estrutura amorfa (vítrea), cuja condutibilidade é geralmente menor do que a dos sólidos não metálicos com

estrutura cristalina e tende a aumentar com a temperatura.

Nos fluidos estacionários a condução ocorre apenas através do impacto quase-elástico entre moléculas adjacentes. Quanto mais denso o fluido, menor o número de moléculas e menor o valor da condutibilidade.

Para a maioria dos líquidos a condutibilidade térmica decresce com o aumento da temperatura e independe da pressão. A água constitui uma exceção, pois sua condutibilidade aumenta com a temperatura até cerca de 120°C , decrescendo em seguida. A água é o melhor condutor de calor de todos os líquidos não metálicos. A tabela 4.3 apresenta valores de condutibilidade térmica para alguns líquidos saturados.

A condutibilidade térmica dos gases e vapores aumenta com a temperatura, mas é essencialmente independente da pressão para pressões próximas à atmosférica (acima e abaixo). Para pressões da ordem da pressão crítica, o efeito da pressão sobre a condutibilidade térmica é significativo, e se traduz em um aumento da condutibilidade com a pressão para a mesma temperatura.

As tabelas 4.4 e 4.5 apresentam respectivamente valores de condutibilidade térmica do ar e do vapor d'água, na pressão atmosférica, para diversas temperaturas.

Tabela 4.3 - Condutibilidade térmica de alguns líquidos saturados - Referência | 29 |

T (°C)	CONDUTIBILIDADE TÉRMICA (k) EM W/m.°C			
	ÁGUA	AMÔNIA	MERCÚRIO	FREON 12
-50	-	0,547	-	0,067
-30	-	0,548	-	0,069
-10	-	0,543	-	0,073
0	0,552	0,540	8,198	0,073
10	-	0,531	-	0,073
20	0,597	0,521	8,682	0,073
40	0,628	0,493	-	0,069
50	-	0,476	9,392	0,067
80	0,668	-	-	-
100	0,680	-	10,499	-
120	0,685	-	-	-
140	0,683	-	-	-
160	0,680	-	-	-
180	0,675	-	-	-
200	0,664	-	12,332	-
250	-	-	13,058	-

Tabela 4.4 - Condutibilidade térmica do ar na pressão atmosférica - Referência | 29 |

T (°C)	k
-23	0,0223
27	0,0262
77	0,0300
127	0,0336
227	0,0404
327	0,0466
427	0,0523
527	0,0578
627	0,0627

Tabela 4.4 - Condutibilidade térmica do ar na pressão atmosférica - Referência | 29 |

Tabela 4.5 - Condutibilidade térmica do vapor d'água na pressão atmosférica - Referência | 29 |

T (°C)	k
107	0,0245
177	0,0299
277	0,0379
327	0,0422
377	0,0464
427	0,0505
477	0,0548
527	0,0592
577	0,0636

Tabela 4.5 - Condutibilidade térmica do vapor d'água na pressão atmosférica - Referência | 29 |

4.1.3.2.2 Principais Fatores que Afetam o Valor da Condutividade dos Isolantes

a) Temperatura - a condutibilidade térmica da maioria dos materiais utilizados como isolantes térmicos aumenta com o aumento da temperatura, como mostrado na figura 4.1. Esse aumento, no

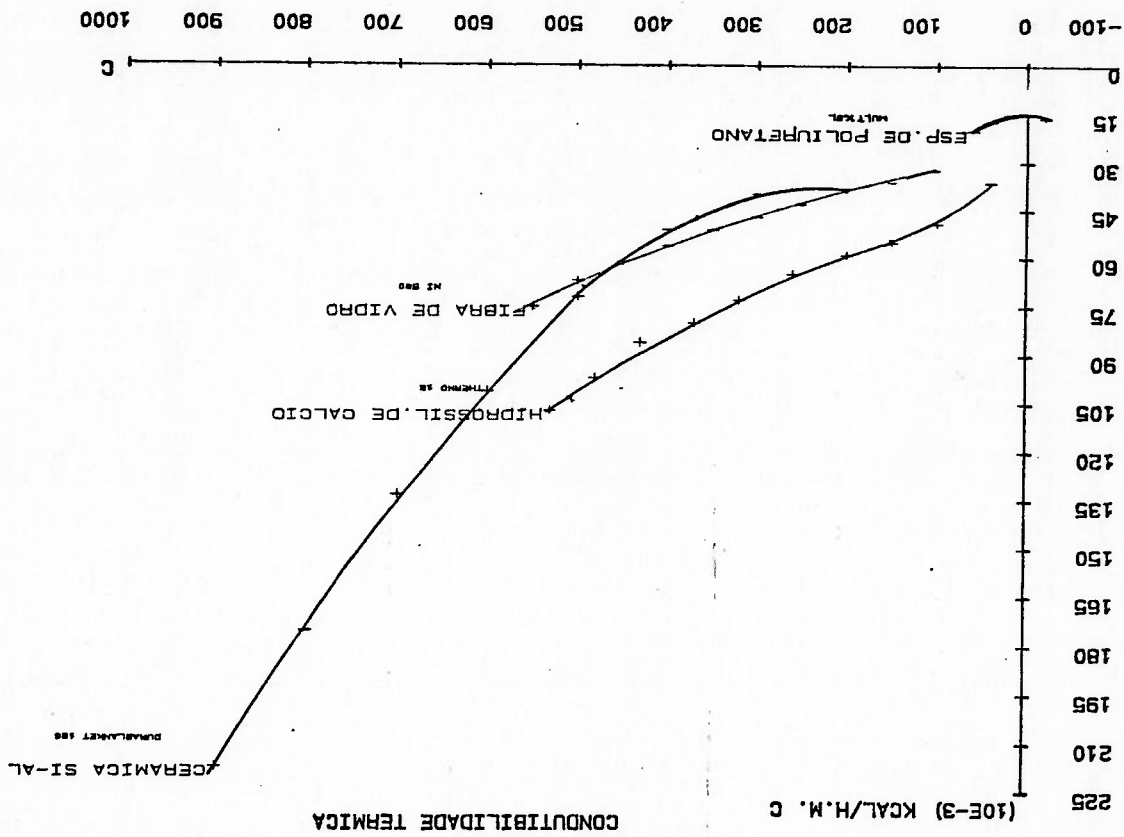


Fig. 4.1 - Variação da condutibilidade térmica com a temperatura para alguns materiais isolantes comuns - Referência [15]

entanto, não se dá com a mesma velocidade para materiais diferentes, aumenta mais rapidamente com a temperatura do que para

teriais com poros finos. Ao se comparar, portanto, os valores de condutibilidade térmica para diferentes materiais isolantes, é imprescindível conhecer os correspondentes valores de temperatura, sob pena de se obter uma comparação de pouco valor prático.

co.

Uma vez que, ao se realizar testes para determinar o \bar{v}_a de k , é necessário manter uma diferença de temperatura entre as faces da amostra, o valor de k varia ao longo da espessura desta. Se a diferença de temperatura for pequena, não se introduz erro considerável tomando-se a condutibilidade para a média das temperaturas, ou seja, para $(T_1 + T_2)/2$. Além disso, se a relação entre k e T for considerada linear, o valor médio de k será igual ao valor de k para a temperatura média.

b) Densidade - a ideia geral, bastante difundida, de que a densidade de um material constitui uma boa indicação do seu \bar{v}_a como isolante, por não ser inteiramente verdadeira, precisa ser adequadamente compreendida. Para os materiais fibrosos, por exemplo, que constituem uma boa parcela dos materiais isolantes mais comumente utilizados, a condutibilidade térmica atinge um valor mínimo para um dado valor da densidade e aumenta em relação a esse valor, quer se aumente ou se diminua a densidade, como se pode ver na figura 4.2, retirada de WILKES [12].

Por outro lado, a figura 4.3, retirada da mesma referência com cas de dezesseite variedades de madeiras norte-americanas,

Fig. 4.3 - Variação da condutibilidade térmica com a densidade relativa de diversas madeiras - Referência |12|

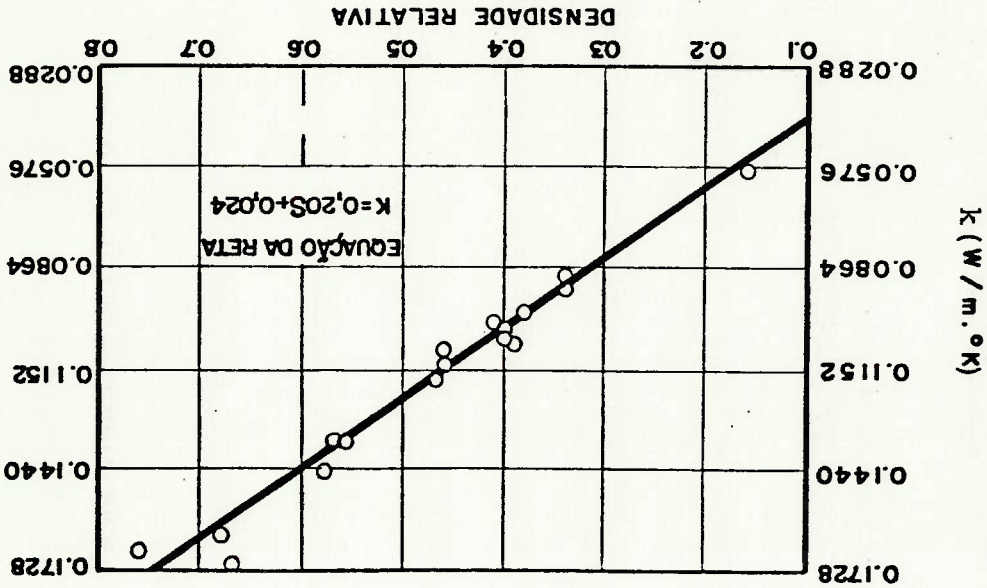
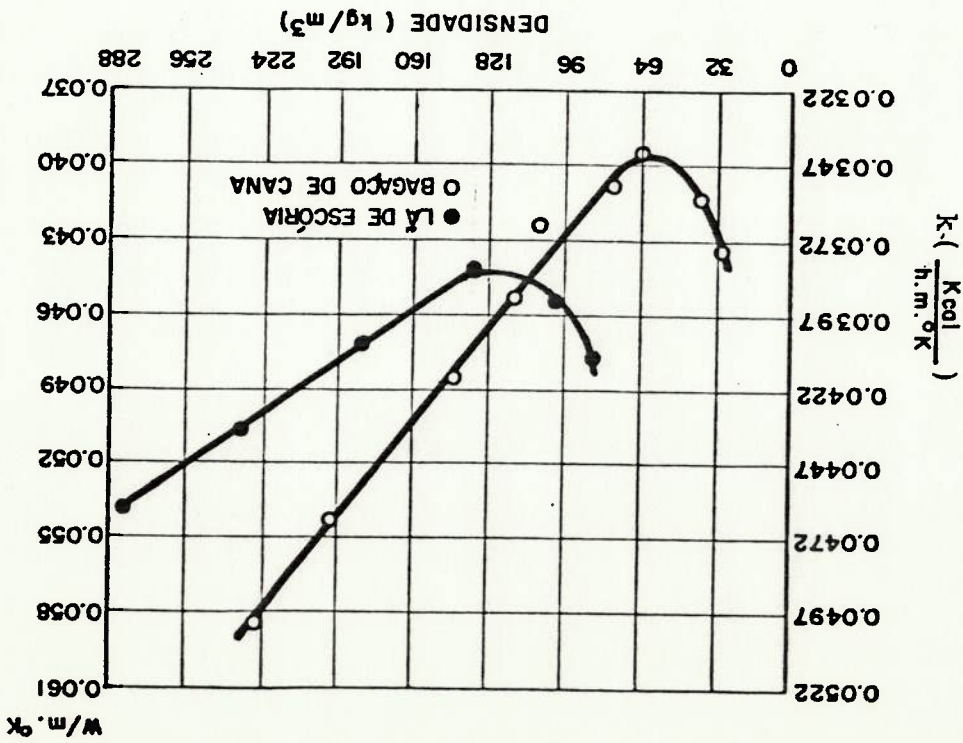


Fig. 4.2 - Variação da condutibilidade térmica com a densidade de materiais fibrosos - Referência |12|



densidades relativas que variam de 0,16 para a balsa até 0,76 para o olmo negro. A relação entre a condutibilidade térmica a uma temperatura média de 30°C e a densidade relativa se revela substancialmente linear, podendo ser expressa pela seguinte equação:

$$k = 0,2005 + 0,024 \rho \text{ W/m} \cdot \text{°C}$$

onde:

ρ é o valor da densidade relativa.

A figura 4.4, extraída de [30], mostra ainda a variação da condutibilidade térmica com a densidade para placas de poliestireno expandido a uma temperatura média de 10°C.

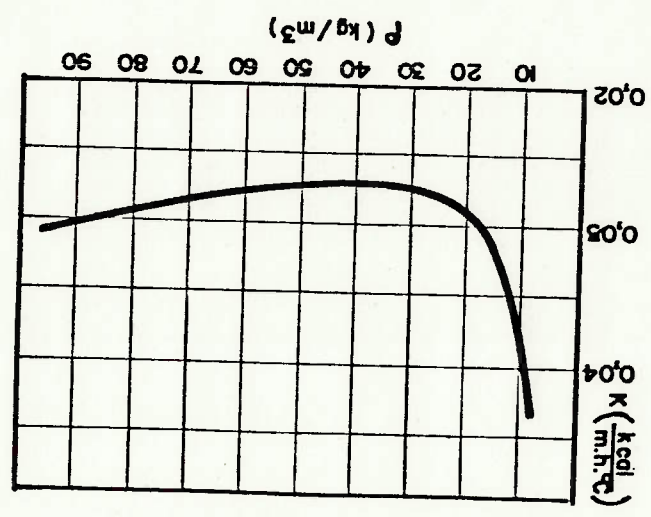


Fig. 4.4 - Variação da condutibilidade térmica com a densidade do poliestireno expandido - Referência [30]

Do exame das curvas $k \times \rho$ fornecidas, bem como das versas mantidas durante visitas técnicas com engenheiros

principais firmas fabricantes de isolantes no Brasil, este autor pode depreender que a maneira economicamente mais sensata de se produzir materiais isolantes com curva condutibilidade x densidade de "em U" é seguir o ramo descendente do U até o mínimo. Dessa forma, a maior quantidade de material utilizado corresponde também um maior valor isolante e um prego mais elevado. Este procedimento parece mais sensato ainda, se lembrarmos que os materiais isolantes não são utilizados apenas com a finalidade de prover isolamento térmica. Frequentemente, esses materiais são também empregados para proporcionar isolamento acústica, onde a densidade desempenha papel preponderante, e até mesmo com finalidade estrutural, como é o caso das placas rígidas de certos isolantes, onde é necessária uma boa resistência à compressão.

c) Umidade - a condutibilidade térmica dos materiais isolantes aumenta com a absorção de umidade do ar ambiente. Certos materiais, como a madeira e a cortiça, têm uma tendência maior à absorção de umidade da atmosfera, enquanto que outros, como as las de rocha e de vidro, são pouco afetados por ela se a temperatura ao longo do isolante se mantiver acima do ponto de orvalho. Além disso, como anteriormente mencionado, o aumento do valor de k decorrente da absorção de umidade do ar atmosférico não constitui um problema sério para os isolantes destinados às aplicações de alta temperatura. Todavia, esta penetração da umidade nos poros dos materiais isolantes é extremamente importante para as aplicações de baixa temperatura.

4.1.3.3 Resistência à Vibração

É a propriedade de um material que indica sua capacidade de resistir à vibração mecânica sem se desgastar, desintegrar ou acumular nas partes baixas do sistema pela ação do próprio peso.

Nas aplicações industriais, praticamente todos os materiais isolantes estarão sujeitos a alguma vibração, seja à vibração de compressores, à pulsação de ventiladores, ou à vibração causada pelo escoamento de fluidos através de canalizações. Consequentemente, é importante que os materiais isolantes empregados nessas aplicações apresentem elevada resistência à vibração. Nas aplicações navais, deve-se somar às fontes de vibração apontadas a própria estrutura do veículo oceânico ou fluvial.

A Norma Britânica da referência [31] prevê métodos de teste detalhados para se verificar a acomodação de materiais isolantes sob três condições:

- a) vibração de alta frequência e baixa amplitude;
- b) vibração de baixa frequência e grande amplitude; e
- c) estabilidade sob o efeito de alta temperatura e vibração.

As duas primeiras condições têm sido particularmente utilizadas para avaliar o comportamento das lãs minerais (vidro, escória, rocha, etc.) e dos produtos granulados quando utilizados em veículos de transporte, enquanto que a terceira condição é de aplicação geral.

4.1.3.4 Absorção de Líquidos

É a propriedade que mede a quantidade de líquido absorvida quando se submerge o material em uma substância líquida de interesse. Esta propriedade é particularmente importante em aplicações onde o isolamento possa entrar em contato com a água, como é sempre o caso das aplicações marítimas, ou com substâncias inflamáveis ou tóxicas.

Por sua importância, é mais provável que se encontre na bibliografia especializada dados referentes à absorção de água. Esta, em alguns casos, pode ser também um indicador da quantidade de líquidos inflamáveis ou tóxicos que o material isolante poderia absorver no caso de ficar exposto ao derramamento desses líquidos. No entanto, é importante ter em mente que um material pode ser mau absorvedor de água e bom absorvedor de hidrocarbonetos, solventes ou outros líquidos penetrantes. Em cada caso, portanto, é conveniente que a absorvidade do material isolante seja testada para o produto químico específico a que ele poderá ficar exposto.

A Norma Britânica da referência [31] prevê dois testes para a determinação da quantidade de água absorvida. No primeiro, os corpos de prova padrões (150x150x25mm) são parcialmente mergulhados em água, cujo nível deve ser mantido constante por 48 horas. No segundo, os corpos de prova são totalmente mergulhados cerca de 25mm abaixo da superfície da água, por um período que depende da aplicação pretendida. Para materiais isolantes destinados a trabalhar em temperatura elevada, o período de imersão é de apenas

nas 2 horas, enquanto que para materiais empregados em isolamento tos de baixa temperatura a imersão deve durar 6 semanas, a uma temperatura de 15 a 20°C.

Os resultados dos testes devem ser apresentados da seguinte maneira:

- a) aumento de massa expresso em kg de água por m² da superfície horizontal imersa (imersão parcial), ou por m³ do material seco (imersão total);

- b) densidade do corpo de prova antes do teste;

- c) condições do corpo de prova, ressaltando particularmente qualquer indicio de deterioração.

Além disso, para o teste de imersão total, quaisquer alterações de volume (acréscimo ou decréscimo) deverão ser expressas como porcentagens do volume seco.

4.1.3.5 Resistência ao Fogo

Antes de abordar esta propriedade, ou melhor, conjunto de propriedades, recomenda-se que o leitor pouco familiarizado com a natureza dos incêndios leia o Apêndice , onde são tecidas algumas breves considerações sobre o assunto.

Conforme mencionado na seção 3.4, há dois aspectos básicos no comportamento dos materiais em relação ao fogo: a reação e a resistência ao fogo.

É importante tornar a ressaltar que não há materiais incom

combustíveis. Certos materiais, no entanto, não queimam nem desprendem vapores em quantidade suficiente para se inflamarem na presença de uma chama piloto, ou de outra fonte de ignição, quando aquecidos até uma temperatura de aproximadamente 750°C. A esses materiais a IMO recomenda que se dê a denominação de não-combustíveis, ao invés de incombustíveis como no passado, para chamar a atenção de que esta não é uma designação absoluta, sendo válida apenas abaixo da temperatura mencionada. É perfeitamente possível que um material que queime acima de 750°C seja chamado de não-combustível, desde que satisfaça os requisitos exigidos abaixo dessa temperatura. Os materiais de interesse podem ser testados quanto à não-combustibilidade de acordo, por exemplo, com a Parte 4 da norma britânica da referência |32|.

Os materiais não-combustíveis são inorgânicos, embora nem todos os materiais inorgânicos sejam não-combustíveis. Até a presente data não existem maneiras de tornar os materiais orgânicos não-combustíveis, seja pela aplicação de revestimentos superficiais, seja pela impregnação com produtos químicos. É verdade que esses tratamentos podem reduzir a suscetibilidade à inflamação e retardar o desenvolvimento do fogo, mas não alteram substancialmente a combustibilidade, nem a decomposição com o calor. Após um certo tempo, ocorre inevitavelmente a liberação de vapores inflamáveis e pouca diferença se nota na combustibilidade diante de um incêndio plenamente desenvolvido. Dessa maneira, todos os materiais orgânicos e todos os plásticos atualmente utilizados são combustíveis.

A citada norma britânica |32|, em suas partes 5, 6 e 7, prevê

4.22

ve ainda testes para a determinação de outros aspectos relevantes no estudo da reação ao fogo de um material, a saber: inflamabilidade, propagação do fogo e espalhamento superficial da chama. Na parte 8 são apresentados os métodos de teste e os critérios para a determinação da resistência ao fogo de elementos de construção.

A resistência ao fogo de um material, conforme anteriormente mencionado, é estabelecida em laboratório empregando-se um programa térmico padrão. A norma da referência | 33 | estabelece que este programa corresponda a uma curva tempo-temperatura contínua, traçada pelos seguintes pontos acima da temperatura inicial da fornalha:

- ao final dos primeiros 5 minutos, 556°C;
- ao final dos primeiros 10 minutos, 659°C;
- ao final dos primeiros 15 minutos, 718°C;
- ao final dos primeiros 30 minutos, 821°C; e
- ao final dos primeiros 60 minutos, 925°C.

A título de comparação, sugere-se igualmente o exame da norma da referência | 34 |, onde se ressalta o fato de que, ao se submeter um material isolante ao teste de resistência ao fogo, o que se pretende é garantir que ele seja adequado para limitar o aumento médio de temperatura de uma antepara de aço isolada em 140°C acima da temperatura inicial (20°C), ao final de um programa térmico padrão de 60 minutos e, assim, evitar o colapso estrutural da antepara por esse período de tempo.

A norma da referência | 32 | chama a atenção para as vantagens

gens computacionais de se definir o programa térmico padrão por intermédio de uma função matemática, tal como recomendado pela ISO em sua recomendação ISO/R 834 - Testes de resistência ao fogo de estruturas. Essa curva, mostrada na figura 4.5, é definida pela seguinte equação:

$$T - T_0 = 345 \log_{10} (8t + 1) ,$$

onde:

t é o tempo do teste, em minutos;

T é a temperatura do forno, em $^{\circ}\text{C}$, no tempo t ; e

T_0 é a temperatura inicial do forno, entre 10 e 40°C .

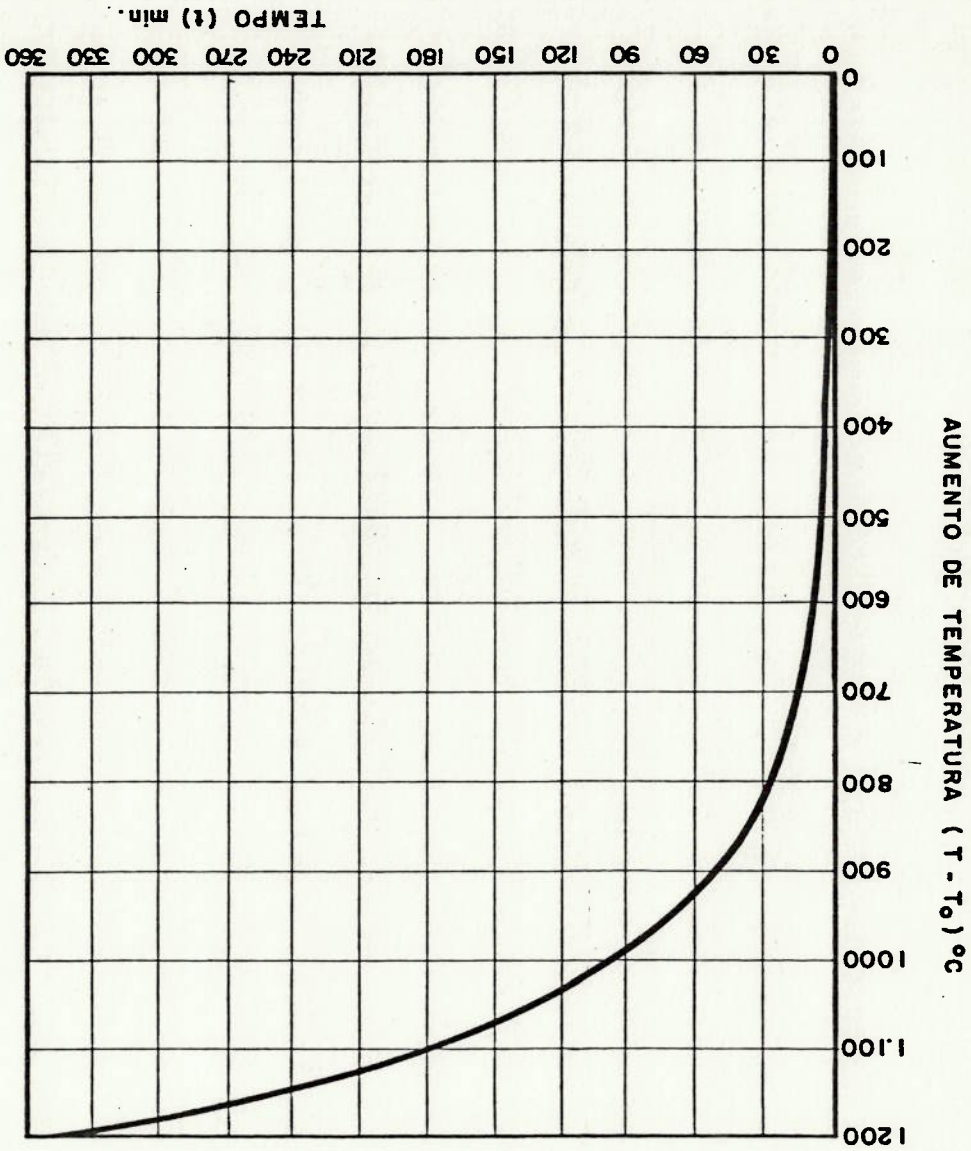


Fig. 4.5 - Programa térmico padrão - Referência | 32 |

Obviamente, como acontece com qualquer material, é possível identificar um número bastante grande de outras propriedades dos materiais isolantes, como a resistência à tração, à flexão, ao empeno, ao cisalhamento, etc., que assumem maior ou menor importância dependendo da aplicação. Todavia, podemos resumir as propriedades desejáveis dos isolantes dizendo que um material é solante, para cada aplicação que se tenha em mente, deve sempre apresentar as seguintes características:

- possuir baixa condutibilidade térmica;
- não ser combustível, nem liberar vapores tóxicos ou asfixiantes quando exposto às temperaturas de serviço;
- poder ser facilmente manuseado e aplicado à superfície que se deseja isolar;
- não ser corrosivo;

4.1.3.6 Propriedades Desejáveis dos Isolantes

isto significa que o corpo de prova falhou com relação ao isolamento após 15 minutos, mas continuou a satisfazer os demais requisitos pelo menos durante 120 minutos.

estabilidade	120,
integridade	120,
isolamento	15,

Os resultados dos testes de resistência ao fogo são dados em termos de tempo, normalmente em minutos, decorrido deste o início do teste até o colapso. Ou, se não ocorrer o colapso do corpo de prova, computa-se o tempo decorrido desde o início até o encerramento do teste. Por exemplo, se obtivermos o seguinte resultado:

- ser insolúvel e quimicamente inativo em presença das substâncias com que venha a entrar em contato;

- não absorver fluidos que possam ser derramados sobre ele; - manter inalteradas sua composição, estrutura e demais características na faixa de temperaturas em que for utilizada;

- uma vez instalado, não romper nem se desgastar, desintegramar ou acumular de maneira desuniforme em decorrência dos esforços a que estiver sujeito;

- não ser atacado por organismos vivos (roedores, insetos, fungos, etc.); e

- poder ser manuseado de maneira higiénicamente segura.

4.2 MATERIAIS DE REVESTIMENTO E VEDAÇÃO

Todos os materiais de revestimento e vedação desempenham uma função básica: proteger o material isolante. Cada um realiza esta tarefa de acordo com suas propriedades.

4.2.1 CATEGORIAS

Individualmente ou em conjunto, esses materiais podem ser enquadrados em uma das seguintes categorias:

- proteção contra intempéries - materiais empregados para proteger o material isolante contra os efeitos de fenômenos atmosféricos, como a chuva, a neve, o granizo, a radiação solar, o vento, etc.

Esses materiais são também utilizados para proteger o isolante contra danos mecânicos.

- barreira de vapor - materiais que, quando instalados na

face do isolamento correspondente à maior pressão de vá-

por, retardam a passagem do vapor úmido para a face cor-

respondente à menor pressão de vapor.

- proteção para interiores - materiais que protegem o mate-

rial isolante contra o desgaste e danos mecânicos em a-

plicações ao abrigo do tempo.

- acabamento decorativo - materiais usados sobre o mate-

rial isolante, ou sobre os outros materiais de revesti-

mento, com a finalidade de proporcionar a cor ou a textu-

ra desejada do ponto de vista decorativo. Esses mate-

riais são especialmente utilizados na construção civil e

no acabamento de compartimentos habitáveis de navios.

É importante ressaltar que a finalidade desses materiais é

proteger o material isolante dos inúmeros fatores adversos a

que ele está exposto. Assim, se eles forem incorretamente sele-

cionados e instalados, deixando de desempenhar adequadamente es-

ta função, compromete-se todo o sistema isolante. Existe muitas

vezes a tendência de se reduzir os gastos nesses materiais quan-

do se executa o projeto, a um ponto em que eles podem se tornar

totalmente ineficazes. Um revestimento que, por exemplo, permiti-

te a passagem de água, compromete seriamente a resistência tér-

mica do sistema e não constitui uma medida economicamente sensã-

ta.

Diversos autores consideram que, cada fator considerado de

per si, um revestimento externo mal projetado e/ou mal aplicado

constitui a maior causa de insucesso dos sistemas isolantes na

prática.

4.2.2 PROPRIEDADES

No desempenho de sua função precisa de proteger o material isolante, os materiais de revestimento e vedação ficam igualmente sujeitos aos esforços, ataques de agentes externos e possibilidades de acidentes inerentes a cada tipo de aplicação. Consequentemente, esses materiais devem apresentar propriedades capazes de satisfazer aos requisitos definidos a seguir.

4.2.2.1 Requisitos Físicos

a) Resistência Mecânica

O material deve resistir, não só aos esforços externos de corte ou cisalhamento, compressão, impacto, abrasão, etc., ilustrados na figura 4.6, mas também aos esforços internos ao sistema, que se manifestam durante a utilização em serviço devido aos diferentes coeficientes de dilatação e contração dos materiais empregados.

Nos sistemas isolantes utilizados em superfície de alta temperatura, o revestimento externo fica submetido à tração, conforme ilustrado na figura 4.7, em virtude do deslocamento diferencial entre a superfície metálica e o isolante, bem como à contração deste devido à secagem provocada pelo aquecimento. A figura 4.8 ilustra o problema da expansão circumferencial.

Nas aplicações de baixa temperatura, em que o metal se contraí, ao invés de expandir, considerando que o coeficiente de dilatação (contração) dos materiais isolantes geralmente é inferior

Fig. 4.6 - Esforços externos sobre o revestimento
 Referência || 11 |

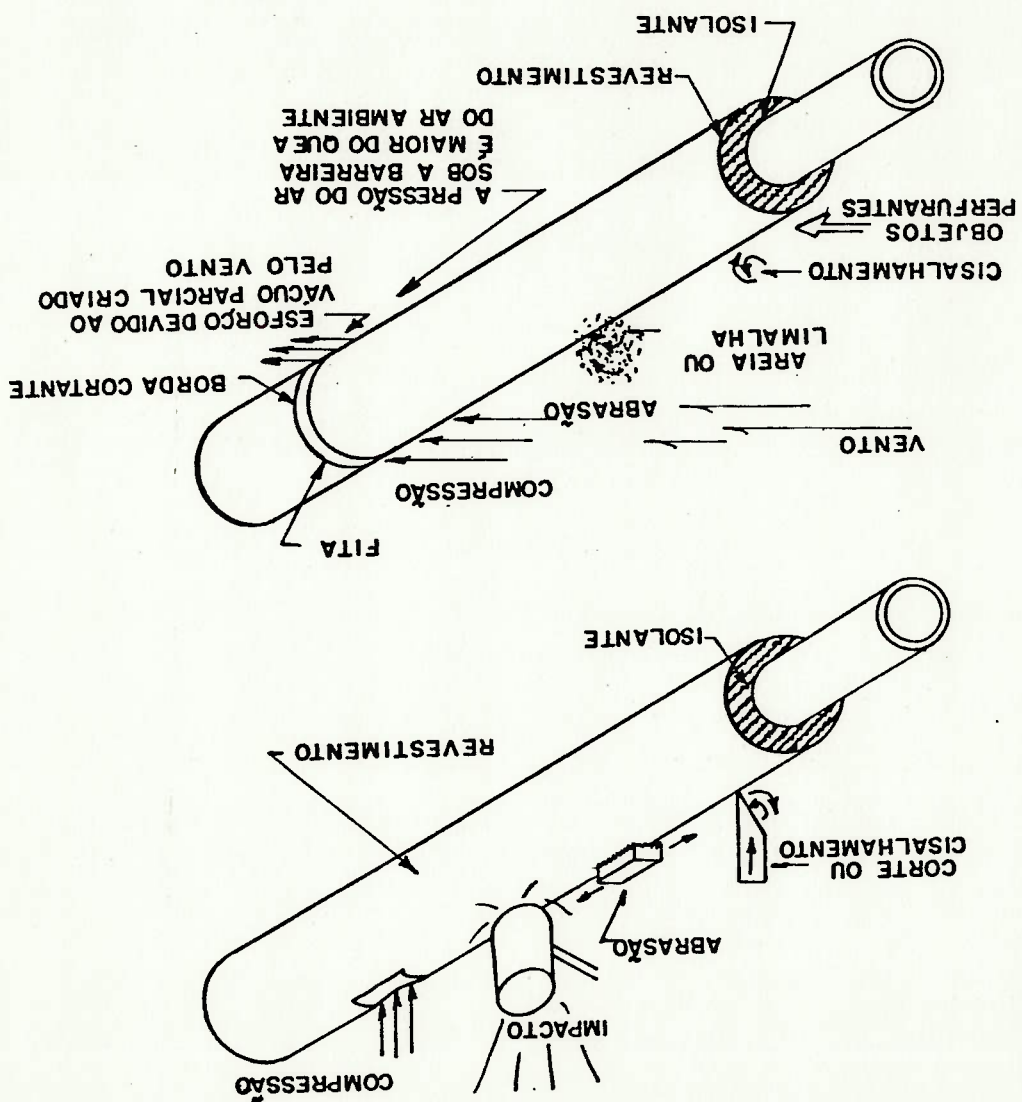


Fig. 4.7 - Efeito do deslocamento diferencial sobre o revestimento - Referência [11]

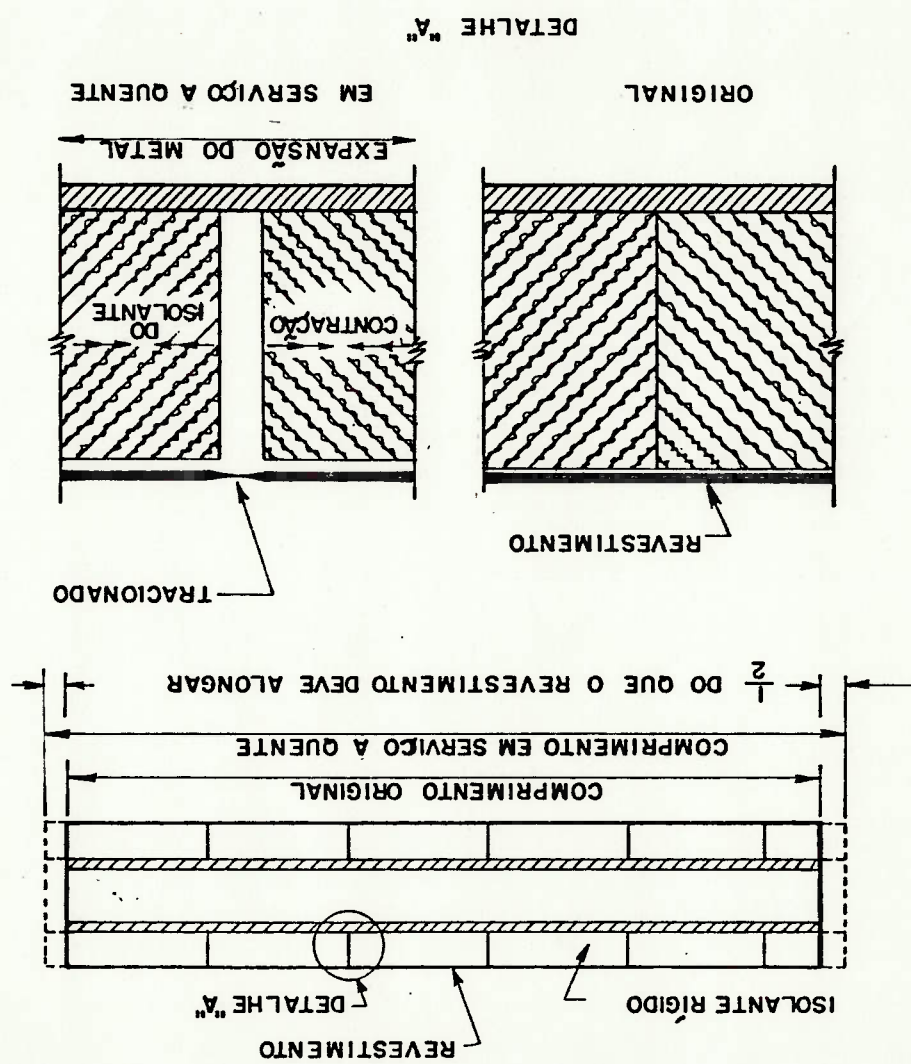
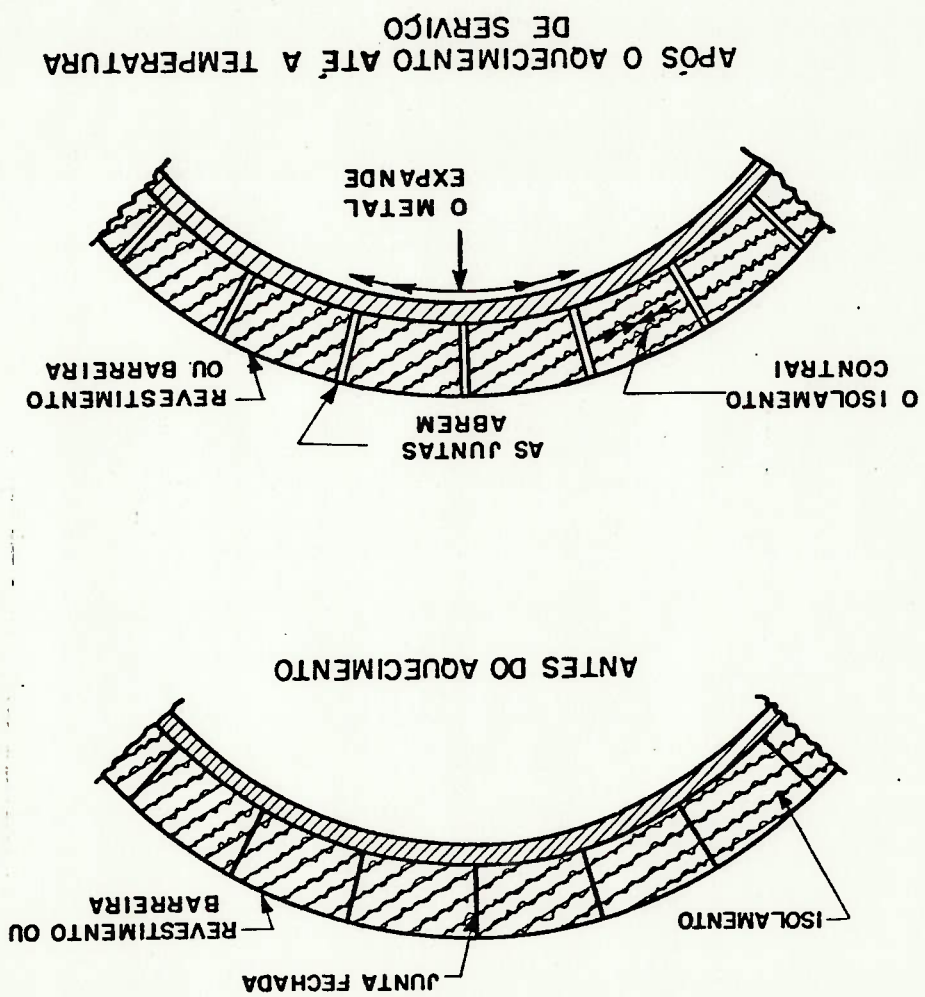


Fig. 4.8 - Efeito da expansão diferencial sobre o revestimento - Referência [11]



Ao serem instalados, os materiais isolantes de alta temperatura normalmente contêm uma boa parcela de umidade, que fica aprisionada ao ser aplicada a barreira externa de proteção. Se o aquecimento após a instalação for brusco, ou se o material de revestimento permitir uma velocidade de migração de vapor excepcionalmente lenta, este fato provocará o aparecimento de bolhas na superfície do revestimento quando este for, por exemplo, uma argamassa flexível. Se a proteção externa for constituída por chapas metálicas, deve-se prever saídas de vapor para que este não venha a se acumular na face interna do revestimento. A esse respeito, é conveniente lembrar que os metais não-ferrosos, como o alumínio comumente empregado como revestimento e o zinco

b.1) Alta Temperatura

interior do sistema.

Quando aplicado sobre isolamentos de alta temperatura, o revestimento deve impedir a penetração de líquidos e, ao mesmo tempo, permitir a migração de vapores para o exterior. Já a barreira de vapor aplicada sobre isolamentos de baixa temperatura deve impedir tanto quanto possível a passagem de vapores para o

b) Resistência à Penetração e Migração de Líquidos

de ilustrado nas figuras 4.7 e 4.8.

lta, o comportamento do sistema será inteiramente análogo aque cliente de dilatação (contração) maior do que o da superfície metá excessiva. Nos casos em que o material isolante tenha um coef. ocorram rachaduras no material isolante devido a uma contração mir o isolante e enrugam o revestimento externo, desde que não rior ao dos materiais metálicos, haverá uma tendência a compr.

A eficácia de uma barreira de vapor é expressa em termos da velocidade com que o vapor d'água a atravessa sob condições definidas, isto é, por um valor de permeabilidade ou de permeância. A permeabilidade se refere à velocidade de transmissão de vapor através da unidade de espessura do material, enquanto que a permeância exprime a transmissão total de vapor d'água a

or à ambiente.

antes que se comece a operar a instalação em temperatura inferior. sistema isolante seco imediatamente após este ter sido instalado, resistente à penetração do vapor d'água e deve ser aplicada ao a superfície externa do sistema isolante. Esta barreira deve ser gra geral, deve-se sempre colocar uma barreira de vapor sobre Nas aplicações de baixa temperatura, portanto, como re

regão da temperatura mais baixa.

car a abertura das juntas, permitindo a passagem do vapor na d'ial entre a superfície isolada e o material isolante pode provocar transmissão de vapor d'água, no entanto, o deslocamento de diferenças de temperatura. Mesmo com materiais que apresentem boa resistência à recem oposição significativa à passagem do vapor através de suas ção de vapor. Já os outros tipos de materiais isolantes não são por células fechadas, possuem uma resistência intrínseca à migração Os materiais isolantes celulares, por serem formados

b.2) Baixa Temperatura

que contêm silicatos de sódio e de cálcio. calina provocada pela umidade que atravessa materiais isolantes que recobre as chapas galvanizadas, são sensíveis à corrosão a

através da espessura com que o material é aplicado. Assim, a permeabilidade (expressa em g.m/s.MN) constitui uma propriedade do material, ao passo que a permeância se refere apenas a uma camada de espessura conhecida após a aplicação. A tabela 4.6 apresenta valores típicos de permeância ao vapor d'água para alguns materiais de revestimento comumente empregados em sistemas de isolamento térmica.

MATERIAL	ESPESSURA APROXIMADA (mm)	PERMEÂNCIA (g/s.MN)
Emulsões à base d'água		
Emulsão de mastique polimérico	1,6	0,029
Emulsão de betume, mineral	3,2	0,046
Emulsão de betume, fibrada	3,2	0,005
Emulsão de latex/betume	3,2	0,003
Soluções de betume e resinas à base de solvente		
Mastique asfáltico	3,2	0,0006
Mastique polimérico	3,2	0,0025
Mastique polimérico	0,5	0,017
Mastique betuminoso	3,2	0,0008
Resina epóxica	0,5	0,003
Mastique à base de elastômero	1,6	0,0035
Diversos		
Folha de alumínio/papel kraft	0,009	0,0024
Folha de alumínio/papel kraft	0,018	0,0008
Fita impregnada com betume	2,0	0,0057
Fita de PVC (auto-adesiva)	0,18	0,068
Fita de PVC (auto-adesiva)	0,25	0,057
Folha de alumínio, lisa ou reforçada	0,018	0,0008
Filme de polietileno	0,05	0,004

Tabela 4.6 - Valores típicos de permeância ao vapor d'água - Referência | 28 |

A norma da referência | 28 | chama a atenção para o fato de que o método de teste pode introduzir variações substanciais no número que expressa o valor da permeância. A esse respeito veja-se também | 35 |. Assim, ao se comparar materiais distintos

quanto à sua capacidade de atuar como barreira de vapor, é impossível assegurar-se que os valores de permeância disponíveis sejam consistentes.

Alguns autores e fabricantes, seguindo a norma alemã DIN 4108, preferem fornecer, ao invés de valores de permeância ou permeabilidade, valores de um coeficiente de resistência (μ) à difusão de vapor. Este coeficiente exprime quantas vezes é maior a capacidade de um material de atuar como barreira de vapor em comparação a uma camada de ar parado de igual espessura, na mesma temperatura. As tabelas 4.7 e 4.8 fornecem valores do fator de resistência para diversos materiais isolantes, materiais de construção e barreiras de vapor usuais.

MATERIAL	ρ (kg/m ³)	μ
<u>Materiais de construção</u>		
Tijolos (lajetas) (a)	1.360	6,8
(b)	1.530-1.860	9,3-10
Telhas	1.880	37-43
Concreto (a)	2.100	23
(b)	2.300	30
Telhas de fibra-cimento	1.920	51
<u>Materiais isolantes</u>		
Espuma de poliuretano	50	5,3
Espuma de poliestireno	20	40-100
Fibra de madeira prensada	460	6,8
Cortixa expandida	100-140	5,0-3,0
Espuma de vidro	140	∞
La de vidro	100-300	1,17-1,27
<u>Barreiras de vapor</u>		
Emulsão betuminosa com aplicação de asfalto quente	-	54.900-138.300
Feltro asfáltico	-	3.640-18.280
Papelão betuminado	-	11.620
Filme plástico 25g/mm ² (0,025mm)	-	32.600-65.000
Lamina de alumínio 40g/m ²	-	∞
Pintura de borracha clorada 0,1mm	-	24.000-77.000
Pintura com tinta a óleo 0,1mm	-	9.800-24.000
Mastique asfáltico-base solvente	-	98.000
Mastique asfáltico-base emulsão	-	4.434

Tabela 4.7 - Coeficiente de resistência (μ) para materiais secos - Referência | 36 |

MATERIAL	ρ APARENTE (kg/m³)	n
<u>Vidros</u>		∞
Vidros planos	-	∞
<u>Metals</u>		
Aço	-	∞
Cobre	-	∞
Bronze	-	∞
Alumínio	-	∞
<u>Materiais Betuminosos</u>		
Asfalto	2.100	vedação
Betume	1.050	"
Papelão asfaltado	1.100	"
<u>Materiais Isolantes</u>		
Isolantes de fibra mineral (vidro,	30-200	1,4
rocha, escória)		
Isolantes de fibra vegetal (algas,	30-200	2
coco, madeira)		
Lã de escórias, solta	-	1,4
Placas de fibra de madeira	200-300	3
Espuma de poliestireno em placas		
Tipo 1	13	40
Tipo 2	16	50
Tipo 3	20	60

Tabela 4.8 - Coeficiente de resistência (n) para diversos materiais - Referência |37|

O exame das tabelas 4.6 a 4.8 nos mostra que apenas os vidros e os metais com espessura suficiente podem ser considerados completamente estanques (ou difusão) do vapor d'água. Em seguida, situam-se os produtos betuminosos e os plásticos, mas com uma certa permeabilidade relativa.

Finalmente, convém ressaltar que, para ser efetiva, a barreira de vapor deve ser mantida íntegra necessitando, portanto, ser protegida contra toda sorte de avarias mecânicas. Além disso, os materiais utilizados como barreiras de vapor por serem

normalmente inflamáveis, contribuem para aumentar o risco de incêndio no sistema em que são aplicados. Por essas razões, é sempre conveniente aplicar sobre a barreira de vapor uma camada de material de proteção. Este pode ser, por exemplo, uma folha metálica, uma combinação de cimento isolante com pano colado, etc. Esta proteção externa, quando se tratar de sistemas expostos, deve desempenhar ainda a importante função de proteger o isolamento to das intempéries.

A figura 4.9 ilustra os pontos em que as barreiras de vapor aplicadas sobre isolantes de canalizações são mais vulneráveis à penetração do vapor d'água. Esses pontos, portanto, devem merecer maior atenção dos engenheiros projetista e instalador para que o sistema isolante venha a desempenhar sua função a contento.

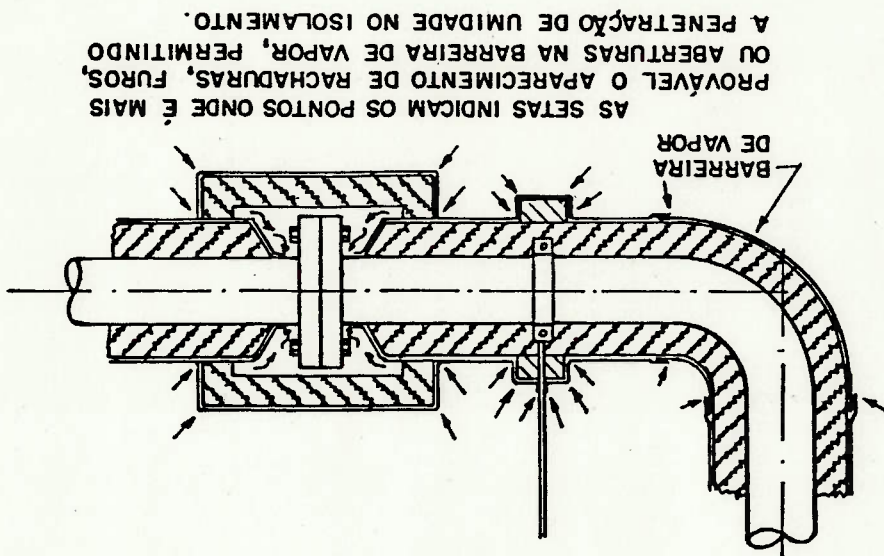


Fig. 4.9 - Pontos vulneráveis nas barreiras de vapor Referência | 11 |

4.2.2.2 Requisitos Químicos

a) Compatibilidade

O primeiro aspecto a considerar neste requisito é que o revestimento ou o vedante sejam compatíveis com o material isó-lante a que são aplicados, isto é, que não ocorram reações químicas entre eles ou a dissolução de um pelo outro. A esse respeito o melhor guia é a consulta aos fabricantes envolvidos. Muitas vezes, os fabricantes de materiais isolante já incluem dados de compatibilidade química em sua literatura técnica, como é o caso da tabela 4.9

TIPO		AGENTE DE ENSAIO	
P	F		
+	+	Água	
+	+	Água do mar	
+	+	Ácido clorídico a 36%	
+	+	Ácido sulfúrico a 95%	
+	+	Ácido fosfórico a 90%	
+	+	Ácido azótico a 68%	
+	+	Ácido fórmico a 80%	
+	+	Ácido acético a 70%	
+	+	Soda cáustica a 40%	
+	+	Potassa cáustica a 50%	
+	+	Amônia a 25%	
+	+	Álcool metílico	
+	+	Álcool etílico	
+	+	Álcool propílico	
-	-	Benzina isenta de aromáticos, óleo Diesel	
-	-	Carburantes, com teor de benzeno	
-	-	Eter acético	
-	-	Benzeno	
-	-	Tetracloreto de carbono	
-	-	Eter e solventes orgânicos	
-	-	Óleo de cascas, isento de aromáticos	
Onde:			
+ estável, o material não é destruído mesmo no caso de exposição prolongada.			
- instável, o material expandido contraí-se mais ou menos rapidamente ou se desfaz.			
F material comum.			
F material auto-extinguível.			

Tabela 4.9 - Estabilidades de placas de poliestireno expandido aos produtos químicos - Referência | 30 |

Em aplicações de alta temperatura, a face externa do sistema isolante pode se encontrar a uma temperatura bastante elevada, especialmente se o revestimento sofrer a ação dos raios solares. Conseqüentemente, é necessário que os materiais de revestimento e vedação sejam adequados para serviço a alta temperatura

a) Temperatura de Aplicação

4.2.2.3 Requisitos Térmicos

Finalmente, não se deve esquecer de levar em conta os fatores que provocam corrosão galvânica quando se usa proteção metálica sobre o sistema isolante. Este fato é particularmente importante quando o material de revestimento é feito de um metal diferente do metal da canalização ou equipamento, e existe a possibilidade de um eventual encharcamento do isolante.

c) Efeitos Galvânicos

É igualmente importante que os revestimentos ou vedantes não contribuam para o ataque às superfícies metálicas a serem soldadas (oxidação e corrosão) e que as condições atmosféricas do meio ambiente sejam levadas em conta, como é o caso de instalações localizadas a beira-mar em estaleiros ou a bordo de navios e de estruturas oceânicas, em virtude da presença de sal no ar. Além disso, os efeitos dos raios infra-vermelhos e ultra-violetas, bem como o efeito oxidante do ar se situam entre as principais causas de deterioração dos materiais de revestimento e vedação dos sistemas isolantes.

b) Ataque e Agentes Externos

tura. Já nas aplicações de baixa temperatura dá-se o inverso, pois a temperatura superficial será inferior à ambiente, e é preciso que os materiais empregados não apresentem fragilidade excessiva a frio, o que provocaria facilmente fissuras ou rachaduras, permitindo a penetração de vapor ou líquido e comprometendo todo o sistema de isolamento.

Como tanto as altas quanto as baixas temperaturas afetam as propriedades físicas e químicas dos materiais de revestimento e vedação utilizados, é importante que os dados fornecidos a respeito desses materiais sejam relacionados as temperaturas extremas a que eles estarão sujeitos.

b) Emissividade

Outro fator importante a considerar é a emissividade superficial do vedante ou revestimento. Em aplicações de alta temperatura, quanto menor a emissividade, maior é a temperatura da superfície, ou seja, a baixa emissividade superficial representa uma barreira adicional à transmissão de calor. Assim, é necessário aumentar a espessura do isolante para compensar este aumento de resistência superficial e evitar que as proteções metálicas passem a constituir um risco de incêndio ou de queimaduras para o pessoal que trabalha nas proximidades da superfície isolada.

Em aplicações de baixa temperatura, um erro frequente de projeto consiste na utilização de tabelas de espessuras recomendadas para evitar condensação, que são elaboradas com base em uma dada emissividade superficial, e, na prática, utilizar uma

riais com emissividade interiores, provocando a condensação superficial.

4.2.2.4 Requisitos de Segurança

A emissividade superficial, pelo que acabou de ser mencionado, constitui um importante requisito de segurança para o pessoal.

Além disso, a parte externa de um sistema de isolamento é aquela que primeiro entrará em contato com o fogo em caso de incêndio. A esse respeito veja-se, por exemplo, |33|, |38|, |39|, |40|, |41|, |42| e |43|. Assim, os materiais de revestimento vedação deverão ser:

- a) não combustíveis - não contribuir para alimentar o fogo, nem liberar calor;
- b) resistentes ao fogo - não se decompor ou deteriorar quando expostos ao fogo;
- c) retardantes do fogo - retardar a propagação do fogo devido do à sua própria combustão;
- d) resistentes a choque térmico - não se decompor, deteriorar, etc., devido a rápidas variações de temperatura;
- e) resistentes à chama - resistir à decomposição ou deterioração quando expostos à chama;
- f) retardantes à chama - retardar a propagação de chama através dele ou sobre ele;
- g) auto-extinguíveis - parar a própria queima após ter sido removida a fonte externa de ignição; e

Nas aplicações de alta temperatura, a umidade que penetrar no isolamento será reevaporizada e migrará para fora do sistema. Este fato produz a falsa impressão de que a penetração de umidade nessas aplicações não constitui problema sério. Todavia, se lembrarmos que cada grama de água requer energia para ser vaporizada, energia que está sendo gerada frequentemente a um preço elevado, compreendemos a importância de se proteger adequadamente os materiais isolantes. Além disso, a eficiência de um isolante

lagão térmica.

é frequentemente negligenciado na instalação de sistemas de isolamento e proteger os materiais isolantes. Isto, embora fundamental, a finalidade precípua dos materiais de revestimento e vedação

4.2.2.5 Requisitos Econômicos

É importante ressaltar que as características de segurança apresentadas devem ser pesadas em relação aos riscos de incêndio a que cada instalação específica estiver sujeita. Assim, essas características serão tanto mais importantes, quanto maior for o risco. Além disso, deve-se lembrar que os materiais de revestimento e vedação fazem parte de um sistema completo de isolamento térmica, e que a determinação das características desejáveis de cada material deve ser feita levando-se também em conta as propriedades dos outros materiais e o custo do sistema como um todo.

não exposta ao fogo.

h) retardantes de temperatura - possuir baixa difusividade térmica, retardando o aumento de temperatura na sua face

Sob a denominação de materiais de fixação engloba-se os inúmeros acessórios utilizados para prender o material isolante à superfície a ser isolada, bem como os materiais de revestimento e vedação ao isolante. A não ser por alguns materiais fabricados para a construção civil, a maioria dos materiais isolantes são materiais estruturais e precisam ser sustentados ou fixados a outros materiais para que se mantenham em posição.

4.3 MATERIAIS DE FIXAÇÃO

Frequentemente se atribui uma importância tão grande ao custo inicial de uma instalação, que se deixa de perceber que a produção que mantém a eficiência do sistema isolante ao menor custo por ano é que é a mais adequada.

Nas aplicações de baixa temperatura, a migração de vapor d'água através do isolante provoca a condensação e/ou o congelamento desse vapor, com a consequente destruição do sistema isolante. A eficácia das barreiras de vapor determina a eficiência e a vida útil dos isolantes aplicados sobre superfícies a baixa temperatura. Um isolante em que ocorre o congelamento generalizado do vapor d'água tem sua eficiência reduzida para cerca de 3 a 7% de sua eficiência quando seco.

de alta temperatura encharcado pode cair a apenas 10% de sua eficiência quando seco, ou seja, a perda de calor por hora na instalação pode vir a ser multiplicada por dez.

De uma maneira geral, os materiais de fixação podem ser

classificados como:

- a) prendedores;
- b) suportes (fixos ou deslizantes);
- c) colas e adesivos; e
- d) reforços.

sendo indispensáveis para a manutenção da integridade do sistema isolante como um todo, sob todas as condições de serviço, é imprescindível que, ao se selecionar os materiais de fixação a serem empregados, sejam igualmente levados em conta os requisitos físicos, químicos, térmicos, de segurança e econômicos pertinentes, a exemplo do que foi feito para os materiais de revestimento e vedação.

Existe uma grande variedade de materiais de fixação, que podem ser obtidos de inúmeros fornecedores ou fabricados pelo próprio utilizador, e cujo emprego depende do tipo de instalação com que se esteja lidando.

CAPÍTULO V

O homem que não comete erros, geralmente não faz coisa alguma.

(*) Edward J. Phelps (1899)

PROJETO DE SISTEMAS ISOLANTES

5.1 - INTRODUÇÃO

Como todo projeto de engenharia, o projeto de um sistema isolante deve constituir um processo sistemático em que cada etapa se suceda à anterior pelo acréscimo de informações concatenadas. Assim, é necessário que cada passo seja dado de maneira cuidadosa e ponderada, procurando levar em conta não apenas o maior número possível de dados disponíveis, mas também as inúmeras implicações das decisões que devem ser tomadas.

A título de exemplo genérico, suponhamos que se deseje projetar o revestimento isolante de cada rede de vapor situada em uma praça de máquinas de um navio, e que se disponha de todos os dados e recursos computacionais para isso. Imaginemos ainda que o

(*) PHELPS, Edward John (1822-1900), professor de direito na universidade de Yale; um dos fundadores da "American Bar Association", e seu presidente em 1880-81; embaixador na Grã-Bretanha de 1885 a 1889. Citação tirada de discurso proferido em 24 de janeiro de 1899.

5.2

projetista seleccione cuidadosamente os materiais a empregar e que obtenha um arranjo físico inteiramente satisfatório. Todavia, não é raro ocorrer que, nas etapas iniciais do projeto, se tenha deixado de considerar necessário limitar a temperatura superficial externa do revestimento isolante em relação aos pontos de inflamação dos diversos combustíveis e lubrificantes utilizados na praça de máquinas. Este fato, que poderia ter menor importância em outras circunstâncias, neste caso específico pode vir a constituir um risco de incêndio intolerável, exigindo que todo o projeto venha a ser refeito ou substituído.

O projeto de um sistema isolante pode ser didaticamente dividido nas seguintes etapas:

- a) estabelecimento dos requisitos e das funções básicas que o sistema deve desempenhar;
- b) determinação das propriedades dos materiais isolantes, de revestimento, de vedação e de fixação necessárias para satisfazer os requisitos do sistema;
- c) seleção dos diversos materiais que atendem os requisitos do sistema;
- d) determinação da espessura de isolamento necessária; e
- e) projeto físico do sistema.

5.2 - ESTABELECEMENTO DOS REQUISITOS E DAS FUNÇÕES BÁSICAS QUE O SISTEMA DEVE DESEMPENHAR

Como se viu anteriormente no capítulo III, os materiais isolantes podem ser utilizados para muitas finalidades. Conseqüentemente, a primeira etapa do projeto consiste em estabelecer que fun-

ção, ou funções, o material deve desempenhar em virtude de sua capacidade de reduzir o fluxo de calor. Por exemplo:

- conservar energia (por razões estratégicas e/ou econômicas);
- evitar perdas, a baixa ou alta temperatura para tornar possível, na prática, a realização de processos com temperatura controlada;
- retardar variações de temperatura em compartimentos, tanques e recipientes;
- evitar condensação de vapores em superfícies internas ou externas;
- limitar a temperatura de superfícies expostas aquecidas, a fim de evitar incêndios ou queimaduras; e
- prover proteção contra incêndio.

Como é comum em engenharia, na maioria dos casos os sistemas isolantes desempenham mais de uma função. Um exemplo típico disto é fornecido pelo sistema isolante para a carga de uma turbina a gás. Neste caso, o sistema isolante, mostrado na figura 5.1, serve para conservar energia, para manter a desejada temperatura do vapor, para proteger o pessoal contra queimaduras e para proporcionar proteção contra incêndio.

5.2.1 - CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Dentro do contexto da determinação de funções do sistema isolante, é da maior importância que se estabeleça corretamente as condições específicas sob as quais se vai operar, ou seja:

- a localização;
- as condições ambientais;
- as temperaturas de processo;
- o tipo de operação;
- os riscos de incêndio;
- a proteção do pessoal; e
- as considerações de natureza econômica.

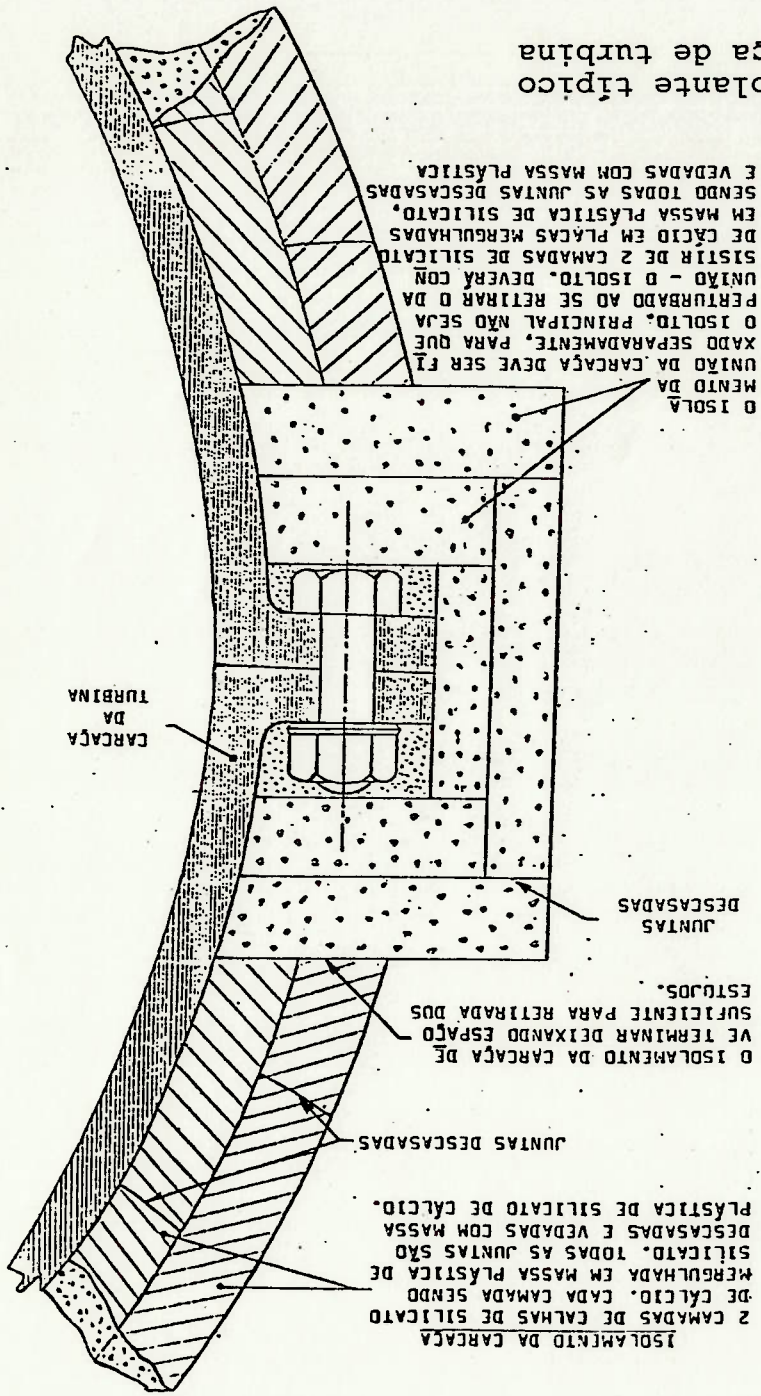


Fig. 5.1-Sistema isolante típico para carga de turbina marítima

A determinação das condições externas em navios não é tão simples quanto para instalações terrestres, em virtude do constan-

pende fundamentalmente da qualidade do sistema isolante instalado. demais lembrar que a eficiência desses sistemas, por sua vez, depende dos sistemas de ar condicionado e ventilação. A propósito, não é os efeitos da insolação) e da água do mar adotadas para o projeto peraturas externas do ar (levando-se em conta quando for o caso, devem ser aquelas que se pretende manter em cada recinto ou as temperaturas de ar (45, 46 e 47). Assim, as temperaturas em cada face do sistema ou compartimento. Veja-se, por exemplo, MAGNUSSON (44), LINDBERG, área mamente ligado ao condicionamento ambiental de cada região, componentes estruturais: costados, conveses e anteparas, esta última já o emprego dos sistemas isolantes para revestimento dos

sistema de isolamento.

ternas, determinam as diferenças de temperatura entre as faces do processo combinadas com as temperaturas ambientais, externas ou internas de Para equipamentos e canalizações, as temperaturas médias de

ao encharcamento com água doce ou salgada, etc. sendo deslocadas, ao ataque pelo derramamento de produtos químicos, posto à agressão por parte de transesuntes e de cargas que estejam a esforços mecânicos diferentes, bem como estará mais ou menos exposta anteparas ou teto, em um compartimento ou corredor, ficará sujeito to. Assim, por exemplo, o mesmo material isolante colocado em uma conta, mas também os riscos e abusos a que o sistema ficará exposto determinar não só as condições ambientais que devem ser levadas em A localização é de uma importância para o projeto, pois vai

te deslocamento de uma zona climática a outra. Por esse motivo, tanto as marinhas de guerra, quanto os organismos civis interessados na construção e operação de navios, procuram estabelecer normas e recomendações que sirvam de orientação para os projetistas na escolha do "ponto de projeto" mais adequado para cada caso.

O Globo Terrestre pode ser basicamente dividido em sete zonas climáticas, que compreendem quatro tipos diferentes de clima: tropical, subtropical, temperado e ártico. Uma grande parte das principais rotas de navegação comercial atravessa climas tropicais e subtropicais e a maior temperatura da água do mar, encontrável no Mar Vermelho e no Golfo Pérsico, é de 38°C, embora a temperatura predominante neste último se situe entre 32 e 35°C. A figura 5.2(*) apresenta os valores de temperatura superficial da água do mar ao longo da costa brasileira e pode ser utilizada como referência no projeto de embarcações mercantes de cabotagem e militares de patrulha.

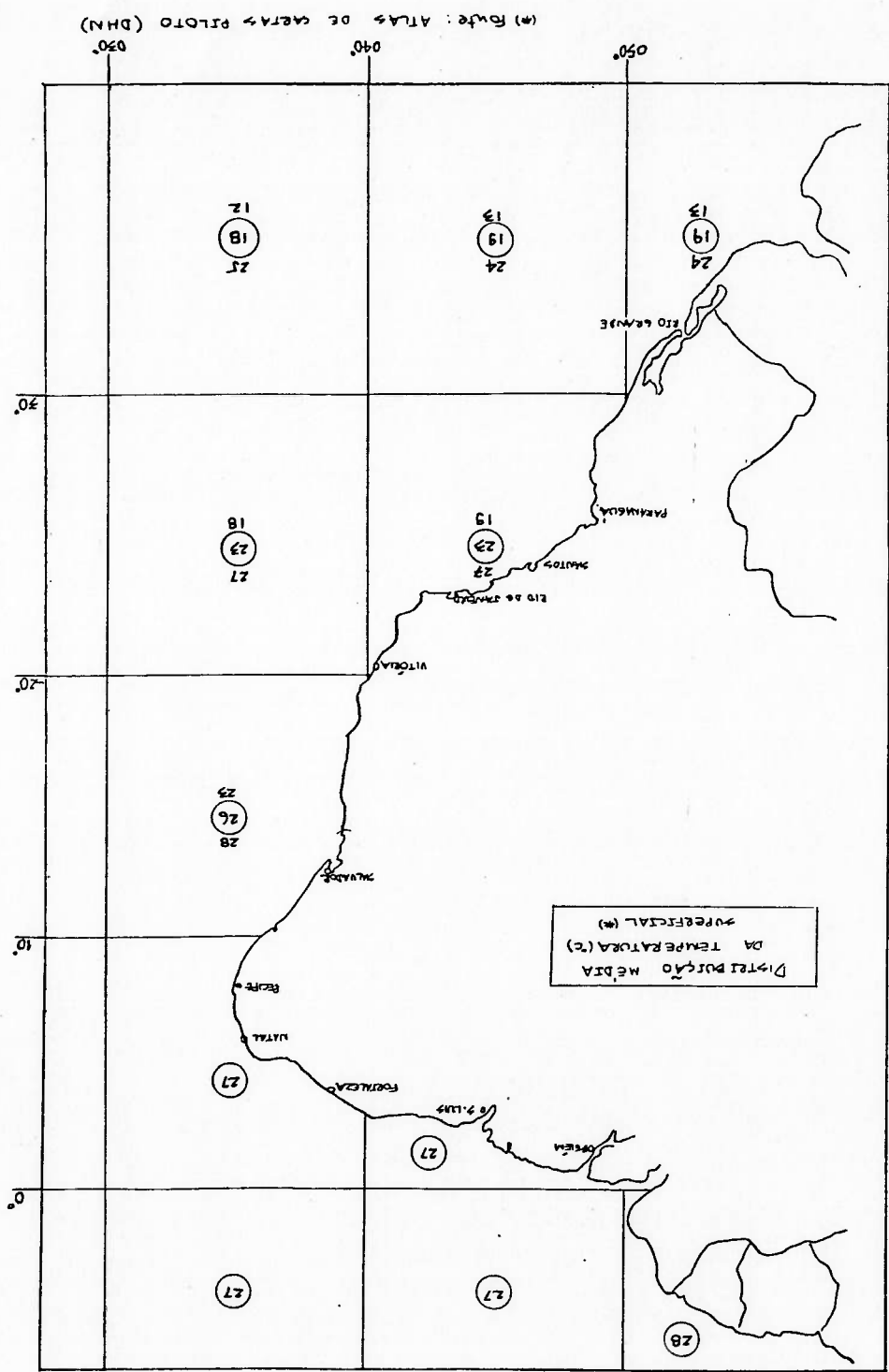
No tocante à umidade, embora o valor máximo seja obviamente 100%, no ar aberto raramente se obtém valores maiores do que 93%. Além disso, é importante lembrar que os maiores valores de temperatura e de umidade relativa não ocorrem simultaneamente.

No oceano a temperatura do ar acompanha a temperatura da água, e isto significa que o clima nunca é extremamente frio ou extremamente quente. As águas interiores, no entanto, podem constituir uma exceção e acompanhar o clima da massa terrestre adjacente

(*)Elaborada, a pedido do autor, pelos Capitães-Tenentes João Bosco Alvarenga e José Helvécio M. de Rezende, alunos de pós-graduação do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo.

Fig. 5.2 - Distribuição média da temperatura da água do mar na costa brasileira

te, como é o caso nos Grandes Lagos da América do Norte e no Mar Báltico, bem como nos já citados Mar Vermelho e Golfo Pérsico. Esta excepcionalidade também se aplica aos portos, pois, estando situados na linha da costa, na fronteira entre a terra e o mar, eles estão expostos não só às tempestades provenientes do oceano, como



também ao clima interiorano trazido pelos ventos que sopram da terra. Esta localização na interface terra-água pode significar para muitos portos temperaturas muito baixas no inverno e, no verão, um clima bastante quente e úmido.

Como nem sempre os navios se destinam à navegação em áreas perfeitamente delimitadas, como é o caso dos "ferries" por exemplo, o projetista deve ter o cuidado de procurar fixar um conjunto de condições externas que não conduza a exageros no projeto. A título de ilustração, a tabela 5.1 apresenta alguns valores sugeridos pela SNAME na referência |48| e pelo VIS (Centro de Padronização dos Construtores Navais Suecos) na referência |49| para as condições do ar externo.

AR EXTERNO		SNAME		VIS	
Verão		Valores Primários		Valores Secundários	
Temperatura de bulbo seco	35°C	35°C	35°C	28°C	-
Temperatura de bulbo úmido	28°C	-	-	-	80%
Umidade relativa	-	-	70%	80%	-
Inverno			Geral	Artico	
Temperatura de bulbo seco	-18°C	-18°C	-15°C	-30 a -35°C	

Tabela 5.1 - Valores recomendados para condições externas. Referências |48| e |49|

Uma vez considerados cuidadosamente os requisitos e as condições a desempenhar, bem como as condições de operação, pode-se passar à etapa seguinte.

5.3 - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES NECESSÁRIAS

As propriedades desejáveis dos materiais que compõem um sistema de isolamento estão intimamente associadas a cada aplicação específica. Não apenas variam os requisitos impostos para cada tipo de instalação, mas também varia a importância relativa desses requisitos em cada caso.

Nas instalações em que, por exemplo, os materiais possam ser contaminados por produtos químicos tóxicos ou altamente combustíveis, o requisito mais importante é que esses materiais sejam totalmente não absorventes. Já em aplicações nucleares, três requisitos fundamentais devem guiar a seleção dos materiais: eles não devem desprender pó, a fim de evitar problemas de poeira radioativa, devem ter uma meia-vida radioativa muito curta e devem poder ser lavados em caso de contaminação. Em alguns processos cíclicos, podem de ser necessário que os materiais tenham baixos valores de densidade e de calor específico, de maneira que a temperatura de operação possa ser variada, sem que seja preciso dispendir uma quantidade excessiva de tempo e energia "aquecendo" o sistema isolante. Naturalmente o oposto é desejável em locais de armazenamento de materiais que devam ser mantidos a temperaturas relativamente constantes.

A avaliação das condições de operação feita na etapa anterior, ou seja, temperaturas máxima e mínima, ciclo térmico, condições ambientais e requisitos de temperatura superficial, permitem estabelecer as seguintes propriedades necessárias para os materiais que compõem o sistema isolante:

- faixa de temperaturas de operação;
- requisitos mínimos de choque térmico;
- difusividade térmica;
- faixa de calores específicos dos materiais utilizados; e
- emissividade superficial dos materiais de revestimento.

Por outro lado, o tipo de instalação em que os materiais de isolamento vão ser aplicados leva igualmente a considerações sobre as propriedades físicas e químicas desejáveis:

- tipo (rígido, semi-rígido ou flexível, injetado, etc.);
- resistência mecânica (flexão, tração, compressão e cisalhamento);

- resistência a vibração e choques;

- estabilidade dimensional;

- capacidade de absorção de líquidos;

- resistência à migração de vapor;

- combustibilidade; e

- etc.

Como as principais propriedades dos materiais que constituem os sistemas isolantes já foram abordadas com certa minúcia no capítulo anterior, considera-se desnecessário estender-se mais sobre esta fase do projeto.

5.4 - SELEÇÃO DOS MATERIAIS QUE ATENDEM OS REQUISITOS DO SISTEMA

Como em todos os problemas de engenharia, não existe apenas um único sistema de isolamento capaz de satisfazer as necessidades de cada projeto que se esteja realizando. Assim, a seleção final

(5.1)

$$\frac{A}{q} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{k_i}}{T_o - T_i}$$

se a seguinte expressão:

O cálculo das perdas de calor por condução através de uma parede plana composta por diversas camadas de materiais diferentes, representada genericamente na figura 5.3, é feito utilizando

5.5.1.1 - Paredes Planas

5.5.1 - CÁLCULO DAS PERDAS DE CALOR POR CONDUÇÃO

A determinação da espessura necessária é feita por intermédio da criteriosa aplicação dos princípios de transmissão de calor abordados no capítulo II a cada caso individual de projeto. Todavia, é conveniente dispor de procedimentos sistematizados que se apliquem a um sem número de problemas práticos, onde se considera a troca de calor em regime permanente entre superfícies de geometria comum e os fluidos que as cercam.

5.5 - DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DE ISOLANTE NECESSÁRIA

Formação técnica do que não passa de técnica de venda. o fizer, deverá estar capacitado a discernir o que constitui in- ter a assistência especializada dos próprios fabricantes. Mas, se pessoal de cada projetista. Para tanto, ele poderá ou não recorrer a custos, disponibilidade, etc., será sempre uma tarefa requisitos a serem atendidos, bem como fatores adicionais como vãos dos materiais a serem empregados, levando-se em conta todos

onde o índice \bar{i} se refere ao material de que é constituída a camada correspondente.

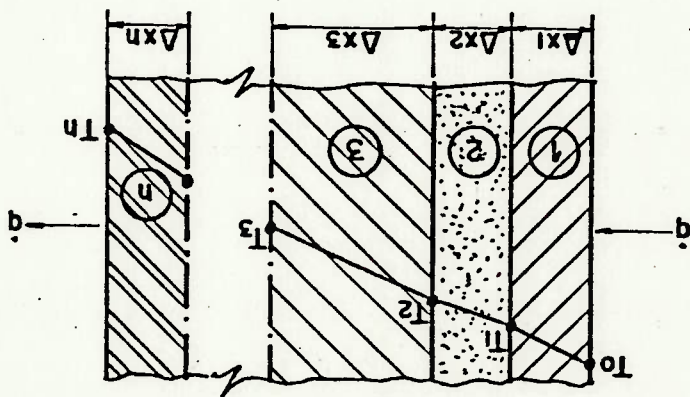


Fig. 5.3 - Condução de calor através de uma parede plana composta - Referência | 2 |

Observe-se que na equação (5.1) só aparecem as temperaturas T_0 e T_n das faces externas da parede e que, geralmente, são os dados disponíveis para projeto.

5.5.1.2 - Paredes Cilíndricas

Para paredes cilíndricas simples, tal como aquela representada na figura 5.4, as perdas térmicas, por unidade de comprimento do cilindro, podem ser calculadas utilizando-se a equação que se segue:

$$\frac{L}{q} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{k_i} (\pi r_{i-1}^2 - \pi r_i^2)}{2\pi k_i (\pi r_{i-1}^2 - \pi r_i^2)} \quad (5.2)$$

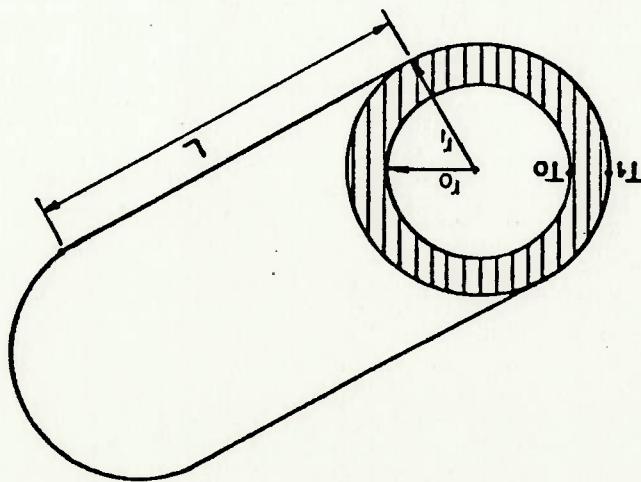


Fig. 5.4 - Parede cilíndrica - Referência [2]

Chama-se a atenção do leitor para o fato de que, no caso de paredes cilíndricas, se for conveniente expressar a perda de energia térmica por unidade de área, deve-se ter o cuidado de indicar claramente se se trata da área interna ou da área externa, uma vez que, como se sabe, a área disponível para transmissão de calor varia com o raio do cilindro. No caso bastante frequente de se considerar a área externa, pode-se utilizar a seguinte expressão para a condução de calor por unidade de área:

$$(5.3) \quad \frac{\dot{q}}{A_1} = \frac{\dot{q}}{2\pi L r_1} = \frac{\frac{k}{r_1} \ln \frac{r_1}{r_0}}{T_0 - T_1}$$

Da mesma forma que na equação (5.1), convenientemente só a parecem os valores de T_0 e T_1 em (5.3). Além disso, esta última expressão pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$(5.4) \quad \dot{q} = k \cdot \bar{A} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta r}$$

ou

$$(5.5) \quad \dot{q} = k \cdot \frac{2\pi L (r_1 - r_0) \ln \frac{r_1}{r_0}}{\Delta T}$$

e, portanto,

$$\bar{A} = 2\pi L \frac{r_1}{r_1 - r_0} \ln \frac{r_1}{r_0} \tag{5.6}$$

A área \bar{A} , como se sabe, é chamada de área média logarítmica da parede cilíndrica. Se, para simplificar, empregássemos no

projeto a área média

$$A_{1+A_0}^m = \frac{2}{\pi L} (r_1 + r_0)$$

ao invés de \bar{A} , o erro percentual cometido seria:

$$e = \frac{A_{1+A_0}^m - \bar{A}}{\bar{A}} \times 100 = \left[\ln \frac{r_1}{r_0} \cdot \frac{2(r_1 + r_0)}{(r_1 - r_0)} - 1 \right] \times 100 \tag{5.7}$$

O erro e , calculado a título de exemplo para um cilindro com $r_0 = 30\text{mm}$ e $L = 1\text{m}$, é mostrado na figura 5.5 em função da razão r_1/r_0 .

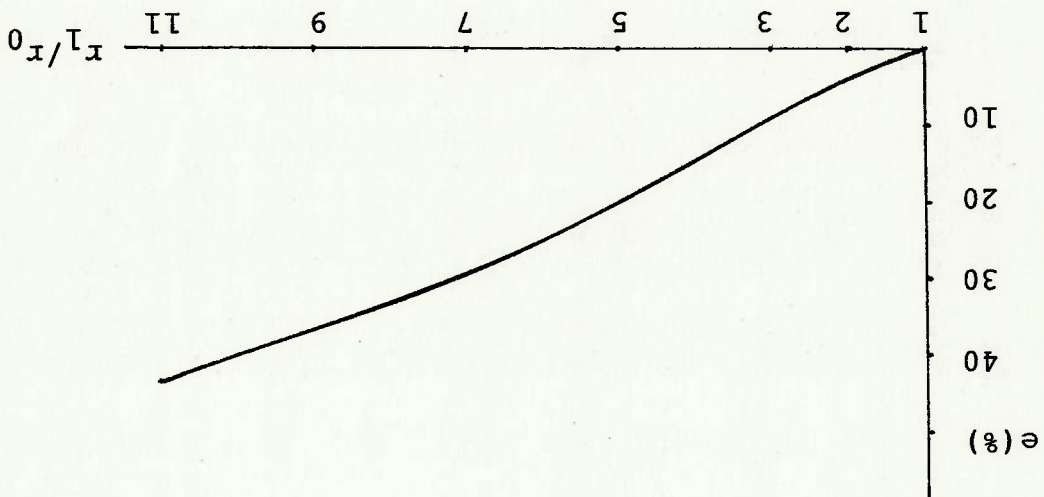


Fig. 5.5 - Erro percentual quando se substitui A^m por A para superfícies cilíndricas

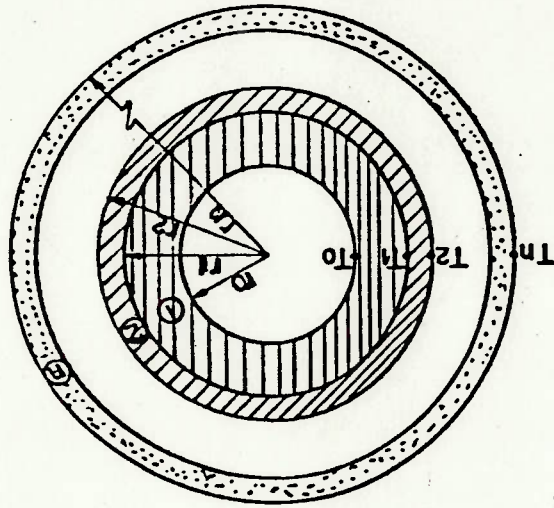
Verifica-se examinando a figura 5.5 que, para tanques cilíndricos relativamente grandes, ou seja, para $r_1/r_0 \approx 1$, não se comete erro apreciável quando se utiliza a área média A^m ao invés

de esfera composta, para a qual pode-se utilizar a seguinte expressão para o cálculo da perda de energia térmica:

Pode-se supor que a figura 5.6 represente também uma seção

5.5.1.3 - Paredes Esféricas

Fig. 5.6 - Paredes cilíndricas e esféricas compostas | 2 | Referência



$$\frac{L}{q} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{L}{k_i} \cdot \frac{r_{i+1}^2 - r_i^2}{r_i r_{i+1}}}{2\pi (T_o - T_n)}$$

(5.8)

Para paredes cilíndricas compostas, representadas genericamente em corte na figura 5.6, pode-se utilizar a seguinte expressão para a perda de energia térmica por unidade de comprimento do cilindro:

da área média logarítmica A.

Foi mostrado no capítulo II que a troca de calor por convecção

CÃO

5.5.2 - CÁLCULO DAS PERDAS DE CALOR POR CONVECÇÃO E RADIAÇÃO

Pelo exame da figura 5.7, que mostra o erro \bar{e} calculado para uma esfera com raio interno, $r_o = 50\text{mm}$, verifica-se que apenas para superfícies esféricas com paredes muito finas em relação ao raio interno é admissível substituir a área aritmética pela geométrica sem erro apreciável.

$$\bar{e} = \frac{A_m - A^*}{A_m} \times 100 = \frac{(r_1 - r_o)^2}{2r_1 r_o} \times 100 \quad (5.13)$$

ra:

Nesse caso, se ao invés da área média geométrica A^* utilizarmos a área média aritmética A_m , o erro percentual cometido será

$$A^* = 4\pi r_1 r_o \quad (5.12)$$

e que, portanto,

$$\dot{q} = k \cdot 4\pi r_1 r_o \cdot \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (5.11)$$

ou

$$\dot{q} = k \cdot A^* \cdot \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (5.10)$$

pode-se escrever para uma parede esférica simples:

Analogamente ao que foi feito para as paredes cilíndricas,

$$\dot{q} = \frac{4\pi (T_o - T_n)}{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{K_i \cdot r_i \cdot r_{i+1} \cdot (r_{i+1} - r_i)}{r_i \cdot r_{i+1} \cdot (r_{i+1} - r_i)}}{n}} \quad (5.9)$$

Assimilando-se T_o em (2.17) à temperatura do meio, T_a em (2.26), e igualmente T_1 à temperatura da superfície sólida, T_n , pode-se escrever para a soma das perdas de calor por convecção e radiação:

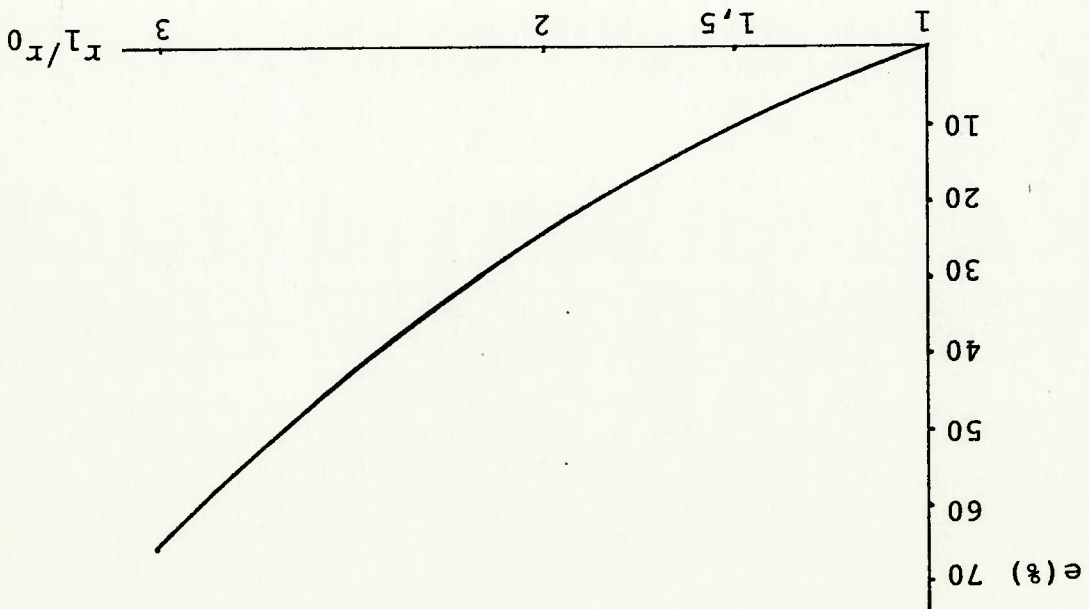
$$\dot{q}_r = h_r \cdot A \cdot (T_n - T_a) \quad (5.14)$$

onde h_r é definido como um coeficiente de radiação.

Utilizando-se o símbolo \dot{q}_r para a perda de calor por radiação (e analogamente \dot{q}_{cv} para a perda de calor por convecção) a equação (2.23) pode ser reescrita da seguinte maneira:

Envolvendo-se o símbolo \dot{q}_r para a perda de calor por radiação entre uma parede sólida e um fluido pode ser determinada pela equação (2.12) de Newton. Da mesma forma, verificou-se que a troca de calor por radiação entre um corpo e o meio ambiente que o envolve pode ser determinada pela equação (2.23).

Fig. 5.7 - Erro percentual quando se substitui A_m por A para superfícies esféricas *



Em regime permanente, a quantidade de calor transmitida por condução através do isolamento, q_c , será igual à troca de calor com o ambiente por convecção e radiação, q_{cv+r} . Assim, a maneira mais simples de resolver o problema consiste em utilizar um procedimento de aproximações sucessivas, adotando-se uma estimativa inicial para a temperatura da superfície externa, T_n , que corresponde a uma dada espessura de isolante e calculando os correspondentes valores de q_c e de q_{cv+r} . Se esses valores não coincidirem, corrige-se a estimativa inicial segundo um critério preestabelecido, por exemplo o acréscimo de uma unidade de espessura, e repete-se o processo sucessivamente, até que a diferença

ambientes.
 ra superficial iguala o ponto de orvalho, T_v , para as condições de um material de isolamento ocorre quando a temperatura limite para a condensação de vapor d'água na superfície

5.5.3 - CÁLCULO DA ESPESSURA PARA EVITAR CONDENSACÃO

Outras fórmulas para o cálculo de h_c podem ser encontradas, por exemplo, em MIKHEEV | 14 |, GASQUET | 25 | e E.F.U.A. | 50 |.

$$h_c = 8,1 + 0,045 (T_n - T_a) \quad \text{Kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C} \quad (5.16)$$

temperaturas superficiais na faixa de 0 a 150°C:
 da fórmula de Hellmann e Koch, válida para convecção natural e para o seu cálculo. Dentre estas, destaca-se abaixo a conhecida de diversas maneiras, existindo várias fórmulas empíricas que, à semelhança do coeficiente de película h , pode ser determinado onde h_c é um coeficiente combinado de convecção e de radiação,

$$q_{cv+r} = h_c \cdot A \cdot (T_n - T_a) \quad (5.15)$$

entre os valores de q_c e de q_{cv+i} seja maior do que um valor arb \bar{t}

brariamente estipulado.

Uma vez calculado o valor de T^n para uma dada espessura de isolamento, Δx , deve-se verificar se $T^n > T^v$.

O ponto de orvalho é a temperatura de saturação correspondente ao produto da umidade relativa, ϕ , pela pressão de saturação, P_g , correspondente à temperatura do ar, T_a , ou seja:

$$P^v = \phi \cdot P_g \tag{5.17}$$

Ora, das tabelas de vapor, veja-se por exemplo GANAPATHY |51|, temos que a pressão de saturação é dada por:

$$P_g = 551,60 + 193,75 \times 10^{-15} (1,8 T_a + 32)^{3,25} \text{ Pa} \tag{5.18}$$

ou

$$P^v = 551,60 + 193,75 \times 10^{-5} (1,8 T^v + 32)^{3,25} \text{ Pa} \tag{5.19}$$

Assim, das condições ambientes temos T_a e ϕ . Com o valor de T_a em (5.18) obtemos P_g . Com P_g e ϕ em (5.17) obtemos P^v . Finalmente, com o valor de P^v e remanejando (5.19) obtemos:

$$T^v = \frac{1}{1,8} \left| \frac{P^v - 551,60}{193,75 \times 10^{-5}} \right|^{1/3,25} - 32 \text{ } ^\circ\text{C} \tag{5.20}$$

Se o valor calculado da temperatura superficial for maior

do que este valor de T_v , não ocorrerá condensação sobre a face exterior do sistema isolante e se pode anotar o resultado e encerrar os cálculos. Se não, torna-se necessário aumentar a espessura do isolamento, a fim de elevar o valor de T_n , e repetir todo o processo até que se obtenha $T_n > T_v$.

5.6 - PROJETO FÍSICO DO SISTEMA

O projeto físico do sistema de isolamento, isto é, sua forma geométrica, a combinação de materiais empregados, as soluções de fixação e proteção, etc., que decorrem dos requisitos impostos pelo meio ambiente e pela finalidade específica que se pretende atender - a exemplo do que ocorre em todas as áreas de engenharia - é tão variado, que em última análise sempre ficará a critério do engenheiro projetista, usando sua experiência e seu bom senso, e laborar um projeto adaptado a cada caso.

Outro aspecto importante a considerar, é que de nada adianta um projeto bem elaborado se a aplicação for mal feita. Assim, apresenta-se a seguir algumas diretrizes gerais relacionadas com aqueles pontos onde um esforço extra do instalador pode produzir resultados altamente compensadores, ao passo que a má qualidade de execução pode por a perder todo o esforço empregado na elaboração de um bom projeto.

5.6.1 - RECOMENDAÇÕES PARA INSTALAÇÃO

5.6.1.1 - Diferença de Temperaturas

Quanto maior for a diferença de temperatura entre as faces

Todas as peças componentes do isolamento devem se ajustar perfeitamente, e quaisquer espaços vazios produzidos pelas tolerâncias de fabricação devem ser obrigatoriamente preenchidos. Todas as superfícies que constituem as juntas de topo entre trechos do isolamento devem ser vedadas e, no caso de haver mais de uma camada, todas as juntas devem ficar bem descasadas. A não observância desses pontos anula a eficácia do isolamento, em virtude da transmissão de calor por intermédio da circulação interna do

5.6.1.2 - Ajuste e Vedação

A tabela 5.2, calculada por TURNER e MALLOY, na referência [11], nos mostra uma comparação entre as perdas térmicas sofridas em flanges isolados e não isolados. A simples constatação das quantidades ponderáveis de energia desperdiçadas, mesmo sem considerar outras consequências nocivas para a operação do sistema do fato de se deixar os acessórios descobertos, nos leva a duvidar da sensatez econômica dessa prática, embora o seu custo inicial possa ser menos elevado. A tabela 5.3 relaciona as espessuras de minilantes empregados no cálculo. Observe-se que são espessuras mínimas.

"quente" e "fria", tanto mais cuidado deve ser tomado para isolar complementares. Todavia, em virtude do aumento da complexidade de instalação, o que encarece a mão-de-obra necessária, é comum deixar-se os acessórios das canalizações e equipamentos: válvulas, flanges, peças de passagem, tampas, etc., sem revestimento ou inadequadamente isolados, atuando como aletas dissipadoras de energia térmica.

deverem ser agrupadas e isoladas como sendo uma única rede, sempre que possível, as pequenas redes de drenagem de vapor como

5.6.1.3 - Isolação de Redes e Canalizações

ar contido nas diversas cavidades e aberturas. A má qualidade do serviço no tocante a estes pontos não pode ser prontamente detetada muitas vezes, mas virá a ser constatada posteriormente pela elevada temperatura superficial do isolamento. Um serviço bem executado resulta em uma temperatura superficial relativamente baixa.

Tabela 5.3 - Espessuras de isolante, em mm, empregadas no cálculo dos valores da tabela 5.2 - Referência [11]

Diam. Ext. Nominal (mm)	Temperatura de Operação (°C)					Diam. Ext. Nominal (mm)
	100	149	204	260	316	
33,4	25	25	38	38	38	168,3
60,3	25	25	38	38	38	219,1
114,3	38	38	38	38	38	273,0

Tabela 5.2 - Perdas térmicas, em Watts, para flanges isolados e não isolados - Referência [11]

Diam. Externo Nominal (mm)	FLANGES NÃO ISOLADOS					FLANGES ISOLADOS				
	100	149	204	260	316	100	149	204	260	316
33,4	90	176	287	407	577	14	20	30	41	33
60,3	188	369	604	859	1210	17	30	45	42	54
114,3	294	762	1243	1767	2494	27	39	45	62	81
168,3	572	1114	1817	2582	3652	31	54	66	74	96
219,1	756	1471	2397	3411	4809	40	62	78	83	109
273,0	1029	2002	3341	4645	6559	46	77	75	102	133

mostrado na figura 5.8. A perda de calor a 400°C em um trecho de um tubo de 150mm de diâmetro corretamente isolado é, teoricamente, apenas cerca de três vezes maior do que a de um tubo de 12mm de diâmetro à mesma temperatura. Isto mostra claramente, que os tubos de pequeno diâmetro constituem uma das fontes principais de transmissão indesejável de calor. Quatro tubos de 12mm de diâmetro, agrupados e isolados como um único tubo, emitem uma quantidade de de calor pouco maior do que um único tubo de 12mm

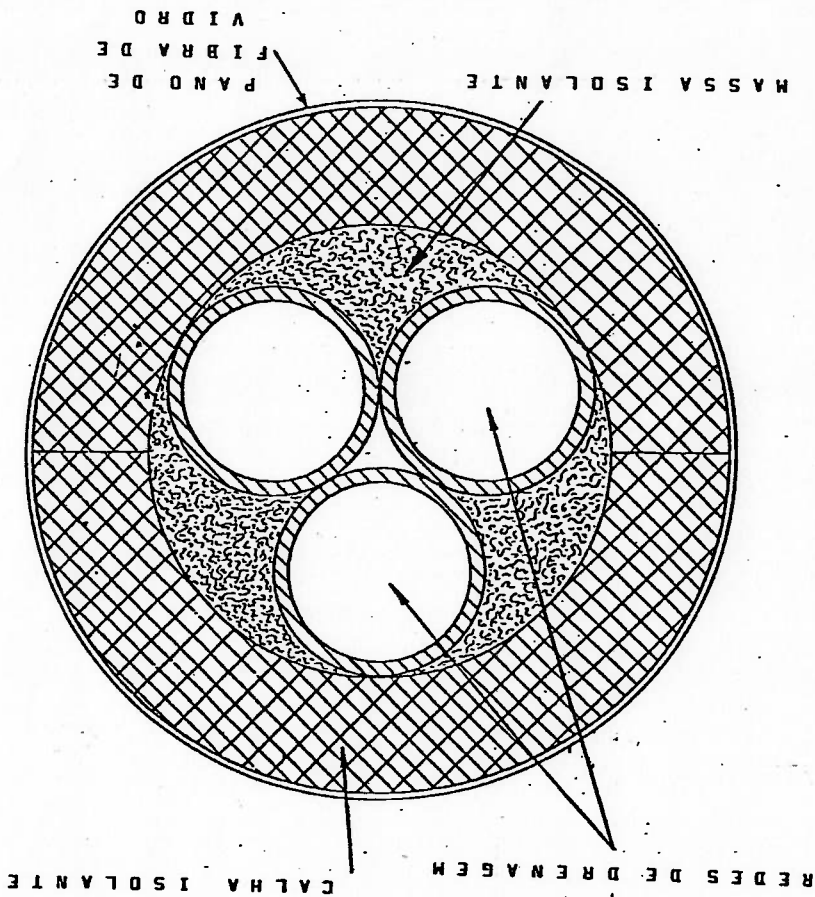


Fig. 5.8 - Agrupamento de pequenas redes em um sistema isolante único

É comum fazer com que os circuitos paralelos, por exemplo, as redes de suprimento e de retorno de um sistema de água gelada,

corram próximos um ao outro. Nesses casos, é importante que as redes sejam adequadamente isoladas uma da outra. Isto é ainda mais importante quando as redes quente e fria se encontram em posições adjacentes. Sempre que possível, todas as válvulas, flanges e acessórios devem ficar descasados, tomando-se o devido cuidado para garantir que, na distância mínima entre as redes, esteja previsto o espaço necessário para se isolar os flanges.

A não observância das diretrizes acima compromete seriamente a eficiência do sistema de isolamento. Além disso, nos compartimentos fechados onde existem canalizações, máquinas e equipamentos, aumenta consideravelmente a transmissão indesejável de calor, comprometendo o conforto, a saúde e a eficiência do pessoal que trabalha nesses locais.

5.7 - EXEMPLO

Com a finalidade de proporcionar ao leitor uma visão abrangente dos tópicos abordados neste capítulo, apresenta-se a seguir um caso típico de projeto de sistema isolante que, embora simples, permite ilustrar a metodologia geral a ser seguida em problemas com qualquer grau de complexidade.

Trata-se de projetar o sistema isolante a ser instalado em uma seção de duto de ar, com a dupla finalidade de proporcionar uma solação térmica e acústica. Um problema desse tipo pode ser abordado sistematicamente da maneira que se segue.

- A) Condições de Instalação
1. Instalação no interior do duto;
 2. Sujeito à velocidade do ar de 3m/s;
 3. Instalação no interior de um retângulo de \bar{X} mm x \bar{Y} mm de aço galvanizado;
 4. Posição horizontal;
 5. Temperatura de projeto do ar no interior do duto, 5°C (278°K);
 6. Temperatura ambiental de projeto, 25°C (298°K);
 7. Umidade relativa ambiental, 60%; e
 8. Emissividade da pintura da superfície externa do duto, 0,9.

- B) Requisitos de Instalação
1. Não constituir risco de incêndio;
 2. Apresentar baixo atrito ao escoamento de ar no interior do duto. Coeficiente de atrito inferior a 0,025;
 3. Proporcionar absorção e isolamento acústicas; e
 4. Não ser arrancado pela corrente de ar.

- C) Funções do Sistema Isolante
1. Reduzir a transmissão de calor do ar externo para o ar no interior do duto;
 2. Evitar a condensação de umidade nas superfícies externas do duto; e
 3. Reduzir a transmissão de ruído para o ambiente.

D) Escolha do Material Isolante

Placa semi-rígida de fibra de vidro. Material cujas propriedades, constantes de certificados fornecidos pelo fabricante por solicitação do projetista, são:

a) pode ser cortado, montado e instalado em dutos;

b) resiste a velocidades do ar maiores do que a exigida

sem ser destruído pela abrasão;

c) possui um índice de propagação de chama (IPC) inferior a 25, de acordo com o método de teste da referência

52|. Este valor é obtido da seguinte maneira:

$$\text{IPC} = 0,515 A_T, \text{ se } A_T < 97,5 \text{ ft. min} \quad (5.21)$$

$$\text{IPC} = 4900 / (195 - A_T), \text{ se } A_T > 97,5 \text{ ft. min} \quad (5.22)$$

onde A_T é a área total sob a curva distância de propagação da

chama versus tempo, obtida de acordo com o procedimento previsto

na referência 52|;

d) possui um índice não superior a 50 para a contribuição

à geração de fumaça, de acordo com a referência

52|, onde os índices $\bar{0}$ e $\overline{100}$ são arbitrariamente

atribuídos, respectivamente, a placas de cimento inor-

gânico reforçado e a tábuas de carvalho vermelho sel-

cionado;

e) a análise dos produtos de combustão, obtidos durante

o citado teste previsto na referência 52|, revela

que o material não contribui acentuadamente para o in-

cêndio. Da mesma forma, as observações realizadas du-

rante o teste mostram que o seu comportamento é satis-

Observe-se que a espessura calculada impondo-se a condição de evitar a condensação é muito pequena, inferior mesmo à menor espessura geralmente fabricada para placas semi-rígidas, que é de 12,7mm. De qualquer maneira, é importante verificar se a per-

Utilizando-se a expressão (5.16), por exemplo, pode-se calcular o calor cedido pelo ar ambiente à unidade de área da superfície externa do duto, chegando-se ao valor aproximado de 59 W/m². Com este valor em (2.11), chega-se finalmente a uma espessura de isolante igual a 7,64mm.

Para as condições ambientais de projeto, temperatura do ar de 25°C e umidade relativa de 60%, o ponto de orvalho é igual a 17°C. Conseqüentemente, a temperatura superficial externa do duto pode, para evitar a condensação, ser fixada em 18°C (291°K). todas as faces.

Embora teoricamente se chegue a espessuras diferentes para cada uma das faces do duto (lados, fundo e topo), em virtude da influência da geometria do sistema nos fenômenos de transmissão de calor, na prática sempre se utiliza a mesma espessura para

F) Cálculo da Espessura do Isolante

- h) também atua como isolante acústico.
 - g) condutibilidade térmica na faixa 5-25°C aproximadamente 0,021;
 - f) coeficiente de atrito ao escoamento de ar de aproximadamente 0,021;
- preendimento e desagregação;
fatorio no tocante ao encolhimento, abaulamento, des-

Não há necessidade de barreira de vapor interna, uma vez que o isolamento fica encerrado no duto metálico e este constitui, para todos os efeitos práticos, uma barreira impermeável ao vapor. Todavia, para que não haja contato do ar restritado com a parede metálica do duto e consequente condensação externa, é preciso que o "conduto" formado pelo isolamento seja contínuo e efetivamente estanque. Para tanto, pode ser adotada uma solução em que uma das paredes metálicas seja rebitada ao restante do duto após a colocação

F) Cuidados na Instalação

Verifica-se da tabela 5.4 que uma espessura comercial de 25,4mm proporciona um rendimento próximo de 90% e, a menos que de saconselhado por considerações de outra natureza, parece ser um valor adequado para o problema.

Tabela 5.4 - Eficiência do sistema isolante para o duto de ar.

Temp. Sup. (°C)	Δx (mm)	\dot{q} (W/m ²)	$\dot{q}_o - \dot{q}$	Eficiência (%)
5	0	180	0	-
18	7,64	59	121	67,2
19	9,65	50	130	72,2
20	12,47	42	138	76,7
21	16,71	33	147	81,7
22	23,81	25	155	86,1
23	38,02	16	164	91,1
24	80,71	8	172	95,6

cem na tabela 5.4. Para tanto, podemos, como visto anteriormente, utilizar o conceito de eficiência do isolamento. Os resultados aparecerão da energia admitida (no caso o ganho de calor pelo ar frio) é razoável. Para tanto, podemos, como visto anteriormente, utilizar o conceito de eficiência do isolamento. Os resultados aparecerão

ção e vedação do isolamento. É particularmente importante cuidar com esmero das uniões das placas de fibra de vidro, vedando-as perfeitamente, a fim de impedir que o ar frio venha a entrar em contato com a chapa do duto externo, provocando o aparecimento de estrias de condensação e gotejamento no lado de fora.

Se as recomendações de estanquidade, em virtude de moti

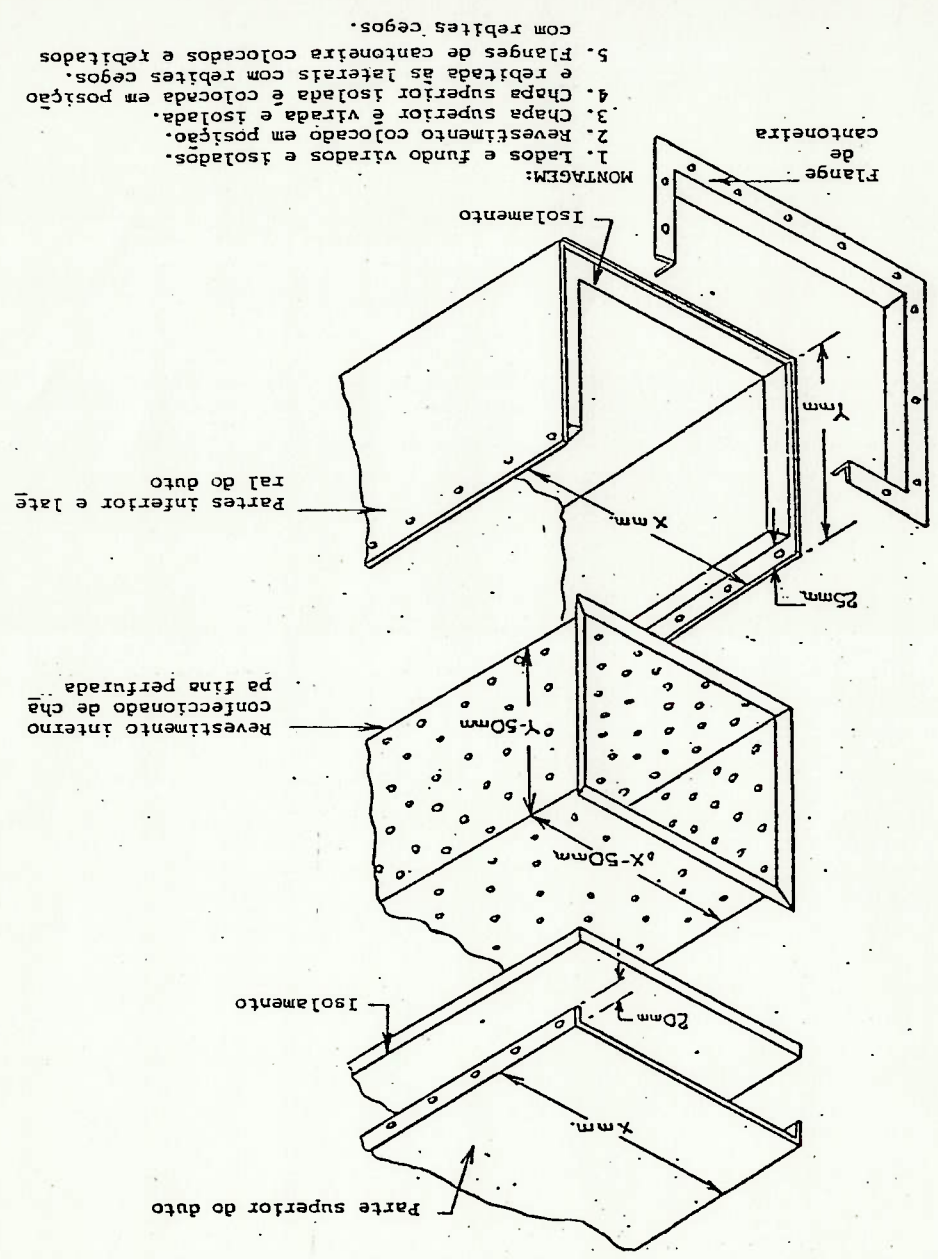


Fig. 5.9 - Sistema isolante termo-acústico para dutos de ar

vos práticos de instalação, não puderem ser seguidas, deve-se con- siderar o isolamento externo ao duto metálico. Isto, no entanto, não seria necessário se a temperatura do ar transportado no duto fosse superior ao ponto de orvalho do ar ambiente. Nesse caso, pō- der-se-ia considerar um sistema isolante do tipo mostrado na figu- ra 5.9.

mas permanecendo o seu emprego um tanto indiscriminado. análoga em todos eles, variando talvez a origem das tabelas, tor de que a situação "mutatis mutandis", era essencialmente Visitas técnicas a outros estaleiros convenceram o au

mais de 30 anos de idade. volta da Segunda Guerra Mundial, ou seja, naquela época com riais existentes no mercado dos Estados Unidos, algumas por comendadas de origem norte-americana, elaboradas para prática de instalação, se baseava em tabelas de espessuras re que por sinal era realizado com esmero e grande experiência Leiro, o autor pôde constatar um fato curioso: todo o serviço, carregado da Oficina de Isolamento Termo-Acústico de um esta- En Ao iniciar sua vida profissional como engenheiro e

6.1 - TABELAS E FÓRMULAS "MÁGICAS"

CONSIDERAÇÕES FINAIS

EDWARD GIBSON
Declínio e Queda do Império Romano, cap. 71)

Tudo que é humano acaba ne
gredindo se não avançar.

CAPÍTULO VI

Posteriormente, entrando em contato com inúmeras outras indústrias em campos bastantes variados, estudando o assunto com mais profundidade e mesmo tendo a oportunidade de investigar o problema em estágios no estrangeiro, o autor convenceu-se de que havia uma curiosa atitude, praticamente "unívoca", em relação aos problemas de isolamento térmica: o repasse da responsabilidade aos fabricantes e empreiteiros instaladores. Assim, inclusive em empresas com departamentos técnicos e de projeto de reconhecida competência, as informações são dadas por fornecedores e empreiteiros-tabelas, curvas e fórmulas - tinham função quase "mágica", na medida em que eram utilizadas sem serem submetidas a uma análise racional.

Ora, como em qualquer ramo, neste há empresas fabricantes e empreiteiras com maior e menor capacidade técnica, e nelas há profissionais com maior e menor competência. Além disso, e este é um problema comum em nosso País, muitas dessas empresas possuem matrizes no exterior, que produzem literatura técnica própria para seus mercados de origem, nem sempre adaptada à nossa realidade pelas filiais.

Mais sério ainda, é o fato de que, por mais competente que seja, o fabricante ou instalador não pode, ou não deveria, conhecer os problemas de seus clientes melhor do que eles próprios.

Consequentemente, por maior que seja a confiança merecida por fornecedores e empreiteiros, é indispensável que se disc

já no capítulo III, procurou-se mostrar a enorme importância econômica e estratégica dos sistemas isolantes, tendo como pano de fundo o esforço de inúmeras nações no sentido de conservar as fontes energéticas disponíveis e aumentar a eficiência de seus parques industriais, com reflexos diretos sobre a economia de divisas, a estabilização do balanço de pagamentos

No capítulo II, ao se apresentar sucintamente os fundamentos da transmissão de calor, teve-se em mente ressaltar os fundamentos científicos que devem nortear todo o tratamento do assunto, mesmo em suas fases finais: nas oficinas e a bordo dos veículos e estruturas marítimas.

Em todo o presente trabalho procurou-se salientar a importância de abordar os problemas de isolamento térmica de forma profissional e criteriosa.

6.2 - ABORDAGEM PROFISSIONAL

Este autor acredita que mesmo pequenos investimentos na formação de recursos humanos para a área de isolamento térmica podem trazer enormes benefícios para as empresas e para o País.

ponha sempre da capacidade de especificar correta e adequadamente o serviço que se deseja adquirir. Além disso, é imprescindível que se seja capaz de avaliar a conveniência dos sistemas isolantes selecionados e a qualidade da obra realizada.

mentos e o aumento da competitividade dos produtos nacionais no exterior.

Os capítulos IV e V foram dedicados aos aspectos técnicos da isolamento térmica, com o objetivo de salientar que, como em todos os campos da engenharia, a seleção e o projeto dos sistemas isolantes devem ser feitos mediante a cuidadosa análise de cada caso. Isto porque as inúmeras possibilidades oferecidas pelos diversos materiais disponíveis, bem como os mais variados requisitos impostos pelas condições específicas de cada instalação, dificilmente recomendam as generalizações superficiais, que só podem conduzir a sistemas isolantes inadequados, deficientes ou economicamente insensatos.

Finalmente, o exemplo que conclui o capítulo V pretendeu apresentar uma maneira ordenada de levar em conta todos os aspectos anteriormente abordados no corpo do trabalho.

6.3 - SUGESTÕES

Com o objetivo de contribuir para o aprimoramento da bordagem dada aos problemas de isolamento térmica em nosso País, particularmente no campo marítimo, apresenta-se a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros:

a) Investigação de métodos mais baratos e acessíveis para a determinação das diversas propriedades desejáveis dos materiais de isolamento térmica;

b) determinação da resistência global à transmissão de

calor de sistemas isolantes nacionais em estruturas básicas, como conveses, anteparas, tetos, etc.!

c) Investigação de casos em que seria conveniente abandonar a hipótese básica de regime permanente, utilizada de forma ampla no projeto de sistemas isolantes;

d) Investigação de técnicas adequadas de inspeção e manutenção com o auxílio, por exemplo, de pirômetros infravermelhos portáteis;

e) Investigação de técnicas que permitam calcular satisfatoriamente a "espessura econômica", particularmente em aplicações marítimas; e

f) Investigação de sistemas isolantes especiais, como aqueles utilizados em navios que transportam gases liquefeitos.

6.4 - OBSERVAÇÃO FINAL

Não é demais repetir que, como se procurou mostrar, de todas as medidas que se pode tomar para economizar energia, manter condições adequadas de processo e atingir tantos outros objetivos vitais para a indústria moderna, geralmente a mais barata, que utiliza materiais de fácil obtenção e que pode ser prontamente adotada na esmagadora maioria de casos é a adequação da isolagem térmica.

Conseqüentemente, acredita-se que esta medida deva sempre merecer atenção e que deva ser posta em prática por profissionais habilitados.

NATUREZA DOS INCÊNDIOS

BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE A

APÊNDICE

O fogo é o resultado de uma reação química na qual certos elementos, como o carbono e o hidrogênio, se combinam com o oxigênio provocando uma liberação de energia na forma de calor e luz.

Certas substâncias ao serem aquecidas liberam vapores. A quantidade de vapor liberado cresce com o aumento da temperatura, até um ponto em que há vapor suficiente para ser inflamado na presença de uma fonte de ignição. Esta temperatura é denominada ponto de fulgor ou temperatura de ignição.

Mesmo na ausência de uma fonte de ignição, se continuarmos a elevar a temperatura do material, atinge-se um ponto em que os vapores liberados se inflamam sem a necessidade de uma fonte externa. Esta temperatura é chamada de temperatura de auto-ignição.

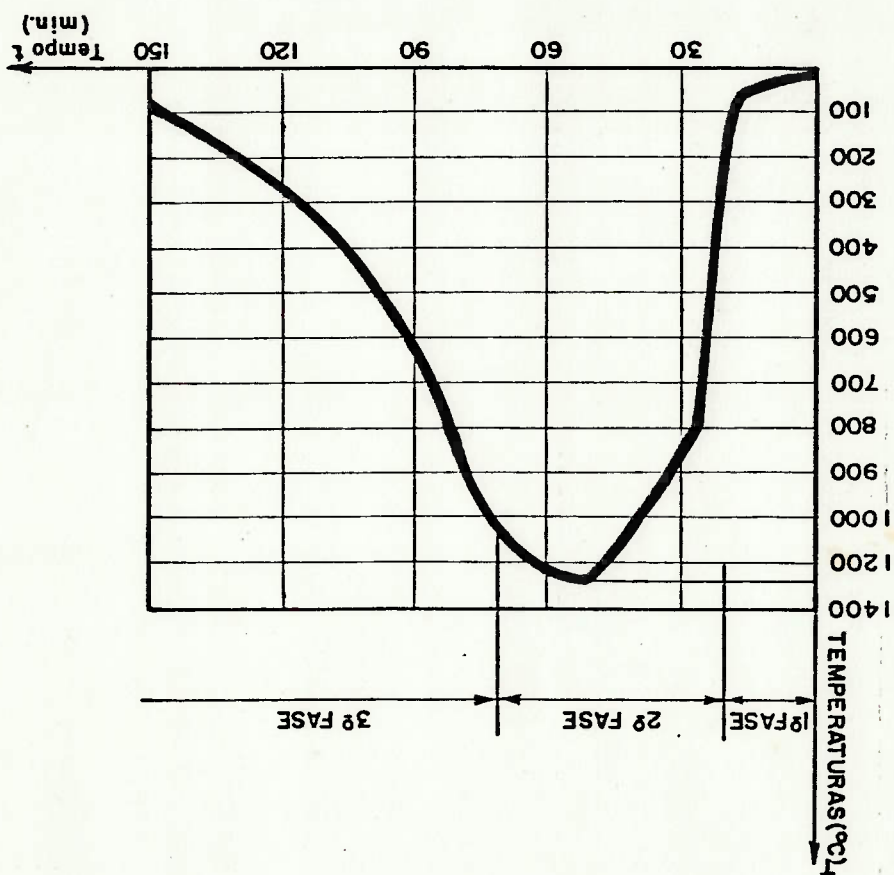
Para o surgimento do fogo é necessário que estejam presentes, simultaneamente, três elementos: um combustível, temperatura adequada e oxigênio. Este último está presente nos combustíveis, dos quais o mais comum é o ar, mas que podem ser também outros compostos químicos, como os nitratos e os cloratos, por exemplo, que suportam a combustão na ausência do ar, além de constituírem um sério risco de explosão quando transportados a bordo de navios.

O ciclo de um incêndio pode ser subdividido em três fases principais, como se pode ver na figura A.1:

- a) inicial - elevação progressiva da temperatura;
- b) intermediária - fogo totalmente desenvolvido; e
- c) final - decadência e extinção.

Cerca de 80% da propagação de calor a partir das chamas de um incêndio, onde a energia é liberada a uma temperatura de cerca de 800 a 1200°C é feita por convecção. O ar aquecido e os gases liberados pelos materiais combustíveis formam uma corrente de convecção que sobe a alta velocidade em escoamento turbulento, espalhando o calor acima e ao redor da área de combustão. A

Fig. A.1 - Evolução do Incêndio - Referência | 53 |



vel.

A transição entre as fases inicial e intermediária, que ocorre com uma elevação violenta e rápida da temperatura, corresponde à inflamação generalizada ("flash-over" na literatura inglesa) e constitui o momento mais crítico do incêndio, que, a partir deste instante, se torna na maioria dos casos irreversível.

Lem disso, ocorre uma correspondente descida de ar mais frio e mais denso até a base do fogo, contribuindo para o aumento da velocidade de combustão e, conseqüentemente, da intensidade do incêndio.

A radiação, embora em menor grau, também concorre significativamente para a propagação dos incêndios. É possível que os materiais combustíveis afastados lateralmente da zona de combustão não sejam atingidos pelas correntes de convecção, mas o calor irradiado pelas chamas pode provocar a liberação de vapores que, por sua vez, podem vir a se inflamar.

Os navios |54| e estruturas oceânicas são na maior parte constituídos por materiais metálicos, bons condutores de calor e, conseqüentemente, deve-se tomar todas as precauções para que o calor não se transmita por condução, através da estrutura, de um compartimento a outro, criando condições favoráveis à inflamação de materiais distantes do foco principal do incêndio.

É importante lembrar ainda, que os incêndios não apenas produzem chamas e liberam calor, mas também provocam o desprendimento de diversos gases, alguns tóxicos e outros asfixiantes.

Os principais gases presentes em um incêndio são o monóxido e o dióxido de carbono, embora possa haver quantidades significativas de outros gases, dependendo dos materiais envolvidos.

A hemoglobina do sangue tem grande afinidade pelo monóxido de carbono. Assim, bastam umas poucas inalações desse gás com

ma concentração de apenas 1,3% para provocar a perda de consciência e a morte em dois ou três minutos. Já o dióxido de carbono é menos tóxico, sendo necessária uma concentração de 9% para tirar a consciência de quem o respira. O aumento da frequência respiratória, no entanto, provocada pela inalação de quantidades reduzidas de ar, aumenta a inspiração de outros produtos da combustão, que, como já vimos, podem ser tóxicos ou asfixiantes. Não se deve esquecer que a maioria das mortes provocadas por incêndios são causadas pelos efeitos asfixiantes e tóxicos da fumaça e dos gases da combustão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FRÉNOT, M. e SAWAYA, N. O Isolamento Térmico. Edições CETOP, Lisboa, 1979.
2. CAMINADA, A.N. Isolamento Térmico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval, São Paulo, jan., 1985.
3. CAMINADA, A.N. Considerações sobre o Projeto de sistemas de Isolamento Térmico. Estudo Técnico nº0810/85, Escritório Técnico de Construção Naval, São Paulo, nov., 1985.
4. DEAN, A. Rains, STILES, H. Richard & HO, Stephen P.K. An Evaluation of Energy Conservation Approaches for Surface Ships. In: Naval Engineers Journal, abr., 1980.
5. SCHATZBERG, Paul, MCPHEE, Archie D., KELLY, Charles M. & LARD, Edwin W. Water/Energy Conservation in Navy Ships. In: Naval Engineers Journal, abr., 1980.
6. DANGEL, Richard & BRICE, Edward. Ship Energy Conservation Assist Team (SECAT). In: Naval Engineers Journal, mar., 1984.
7. DETOLTA, Joseph P. & FLEMING, Jeffrey R. A Computer Model for Shipboard Energy Analysis. In: Naval Engineers Journal, set., 1984.
8. PEHLIVAN, H. & KENYON, Clarence W. Opportunities for Pacific Fleet FF-1052 Class Ships to Save Energy. In: Naval Engineers Journal, mai., 1985.
9. MASTRONARDE, Thomas P. Shipboard Cogeneration - A Second Generation Design Approach. In: Naval Engineers Journal, mai., 1985.
10. REINO UNIDO, Department of Energy. The Economic Thickness of Insulation for Hot Pipes (fuel efficiency book let nº 8), Londres.

11. TURNER, W. & MALLOY, J. Thermal Insulation Handbook. Robert E. Krieger Publishing Co. e McGraw-Hill Book Co., New York, 1981.
12. WILKES, G.B. Heat Insulation. John Wiley and Sons, Inc, New York, 1950.
13. JAKOB, M. & HAWKINS, G.A. Elements of Heat Transfer. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1957.
14. MIKHEYEV, M. Fundamentals of Heat Transfer. Mir Publishers, Moscou, 1956.
15. CAMINADA, A.N. et al. Características e Condições de Térmica de Isolantes. Estudo Técnico nº 0883/1987, Escritório Técnico de Construção Naval, São Paulo, Ev., 1987.
16. ESTADOS UNIDOS, Naval Sea Systems Command. Naval Ship's Technical Manual, NAVSEA 0901-LP-635-0001, Chapter 635 Thermal Insulation. Washington, 1976.
17. REINO UNIDO, Ministry of Defense, Ship Department. Naval Engineering Standard 703, Thermal and Acoustic Insulation of Hull and Machinery. Jan, 1981.
18. THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS. Technical and Research Bulletin nº 4-7, Thermal Insulation Report. New York, 1966.
19. THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS. Technical and Research Bulletin nº 2-21, Aluminum Fire Protection Guidelines. New York, 1976.
20. ESTADOS UNIDOS, Naval Sea Systems Command. Technical Manual, NAVSHIPS 0941-038-7010, Installation Design Criteria for Gas Turbine Applications in Naval Vessels. Philadelphia.
21. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 5422, Specification for the Use of Thermal Insulating Materials, 1977.

22. McMILLAN, L.B. Heat Transfer Through Insulation. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 6 dez., 1926.
23. TURNER W. & MALLORY, J. Handbook of Thermal Insulation Design Economics for Pipes and Equipment. Robert E. Krieger Publishing Co., Huntington, New York, 1980.
24. GONCALVES, A. Some Facts About Portuguese Insulation Corkboard. Conferência. ISOCOR Aglomerados de Cortiça A.C.E., Lisboa.
25. GASQUET, R. Isolation Thermique Industrielle. Dunod, Paris, 1966.
26. ROCCHICCIOLI, G. O Papel da Engenharia na conservação de Energia. In: Atualidades do Conselho Nacional de Petróleo, mai./jun., 1978.
27. HARRIS, P. Economic Thickness of Insulation - An Easier Way. In: The Heating and Ventilating Engineer, fev./mar., 1984.
28. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Code of Practice for Thermal Insulation of Pipework and Equipment (In the Temperature Range -100°C to $+870^{\circ}\text{C}$), Londres, 1981.
29. ECKERT, E.R.G. & DRAKE, R.M. Heat and Mass Transfer. McGraw-Hill Book Company, New York, 1959.
30. BASF. Styropor, Informação Técnica, Construção Civil, Propriedades Gerais.
31. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 2972, Methods of Test for Inorganic Thermal Insulating Materials. Londres, 1975 (Amend. 1979, 1982).

32. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 476, Fire Testes on Building Materials and Structures. Parts, 4, 5, 6, 7, and 8, Londres.
33. BRASIL, Ministério da Marinha, Diretoria de Portos e Costas. PORTOMARTEC nº 20T8604 - Requisitos de Proteção Contra Incêndio para Materiais e Dispositivos Empregados a Bordo de Embarcações Nacionais. Rio de Janeiro, dez., 1986.
34. ESTADOS UNIDOS, Department of Transportation, Coast, Guard. Code of Federal Regulations, Shipping. 46 CFR 164.007, Structural Insulations. U.S. Government Printing Office, Washington, 1982.
35. THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. E96-66T, Method of Test for Measuring Water Vapor Transmission of Materials in Sheet Form. Philadelphia.
36. CUNHA, A.G. da e NEUMANN, W. Manual de Impermeabilização e Isolamento Térmico. Texsa Brasileira Ltda. e Editora Argus, Rio de Janeiro, 1979.
37. NEUFERT, E. Manual del Styropor (Styropor Handbuch). Editorial Herder S.A., Barcelona (Bauverlag, Wiesbaden), 1970.
38. ESTADOS UNIDOS, Naval Sea Systems Command. MIL-STD-1623C (SH), Fire Performance Requirements and Approved Specifications for Interior Finish Materials and Furnishings (Naval Shipboard Use). Philadelphia, 1978.
39. REINO UNIDO, H.M. Naval Base, Central Dockyard Laboratory. The Development of the Oxygen Index Concept for the Assessment of the Flammability Characteristics of Materials. Portsmouth, nov., 1973.

40. REINO UNIDO, Ministry of Defense, Ship Department. Report D.G. Ships/253/464/17, Fire, Smoke and Toxic Gas Characteristics of Materials and Material Systems Used in H.M. Ships. Bath, ago., 1969.
41. INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, Sub-Committee on Fire Protection. Fire Tests and Criteria for Plastic Piping on Board Ships. Submitted by Norway. Londres, 9 dez., 1985.
42. THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test for Surface Flammability of Materials Using Radiant Heat Energy Source-ASTM E-162-81a. Philadelphia, 1981.
43. THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solids-ASTM E-662-83. Philadelphia, 1985.
44. MAGNUSSON, H. Thermal Insulation. In: SF Review, Maritime Edition, vol. 8, Estocolmo, 1971.
45. LINDBERG, B. Indoor Climate. In: SF Review, Maritime Edition, vol. 8, Estocolmo, 1971.
46. LINDBERG, B. Engine Room Climate. Idem.
47. LINDBERG, B. Cargo Hold Climate. Idem.
48. THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS AND MARINE ENGINEERS. Technical and Research Bulletin no 4-16, Recommended Practices for Merchant Ship Heating, Ventilation and Air Conditioning Design Calculations. New York, 1980.
49. LINDBERG, B. Exterior Climatic Conditions. In: SF Review, Maritime Edition, vol. 8, Estocolmo, 1971.
50. THE ENGINEERING EQUIPMENT USERS ASSOCIATION. Thermal Insulation of Pipes and Vessels. Parts 1, 2 and 3, Consultative and Company Ltd., Londres, 1964.

51. GANAPATHY, V. Pocket Computer Sizes Insulation to Avoid Surface Condensation. In: Heating/Piping/Air Conditioning, ago., 1984.
52. THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials-ASTM E-84-84a. Philadelphia, 1984.
53. ROSSO, T. Caracterização da Resistência ao Fogo no Ambiente das Edificações. In: Engenharia, nº 394, mar., 1977.
54. COGON, G. Fire Protection, Detection and Exinction in Ships. Lloyd's Register of Ships, Londres, 1974.

BIBLIOGRAFIA

1. ABRAMOVITZ, J.L. & CORDERO, R. How to Select Insulation Thickness for Hot Pipes. In: Chemical Engineering, 21 Jul., 1975.
2. ASTILLEROS Y TALLERES DEL NOROESTE SA (ASTANO). Metastá no 20. Astano Develop an Internal Insulation System for LCN Storage and Transportation. In: Shipping World & Shipbuilder, Jun., 1979.
3. BOUVRY, J.C. & CLEMENT, P. Nouvelle Génération d'Isola tion Thermique, Nouvelle Prospective en Matière de Chauffage de Locaux. In: Chauffage, Ventilation, Condi tionnement (Revue de l'Association des Ingénieurs de Chauffage e de Ventilation de France), dez., 1986.
4. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 3533, Glossary of Thermal Insulation Terms, Londres, 1981.
5. CLOSE, P.D. Sound Control and Thermal Insulation of Buildings. Reinhold Publishing Co., New York, 1966.
6. CRAWFORD, D. The £ 800m Economy Drive. In: Heating and Air Conditioning, Jul./ago., 1986.
7. FARHAT, G.M. & YAMANE, E. Efeito das Dimensões Geométricas de uma Sonda Utilizada na Medição Experimental da Condutibilidade Térmica de Materiais Isolantes Termicos. 2º Congresso Latinoamericano de Transferência de Calor e Matéria, São Paulo, 1986.
8. FILSTEAD, C.G. & BANISTER, M. Low-Temperature, Liq uefied-Gas Transportation. The Society of Naval Archi tects an Marine Engineers, Annual Meeting, 16-17-nov., 1961.
9. HANDISYDE, C.C. & MELLISH, D.J. Thermal Insulation of Buildings. Her Majesty's Stationery Office, Londres, 1971.

10. IDENDEN, A.R. Thermal Insulation on Heating, Ventila-
ting, and Air Conditioning Installations. In: The Hea-
ting and Ventilating Engineer, vol. 58, no 673.
11. ISHIKAWAJIMA-HARIMA HEAVY INDUSTRIES (IHI). A New LGN
Tank System from IHI. In: The Naval Architect, Jun.,
1984.
12. OLIVIERI, J.B. How to Design Heating-Cooling Comfort
Systems. Business News Publishing Co., Birmingham, MI
chigan.
13. PROBERT, S.D. & HUB, D.R. Thermal Insulation. Elsevier
Publishing Co. Ltd., Barking, Essex, Reino Unido, 1968.
14. REINO UNIDO, Department of Industry. Industrial Energy
Thrift Scheme: A Preliminary Analysis of the Potential
for Energy Conservation in Industry. Londres, 1977.
15. REINO UNIDO, Department of Industry. Industrial Energy
Thrift Scheme Report no 4: Energy Use in the Shipbuild-
ing and Marine Engineering Industries. Londres, 1979.
16. SCHLÜNDER, E.V. (editor). Heat Exchanger Design Hand-
book. Hemisphere Publishing Corporation, Washington,
1983.
17. SHELL RESEARCH. First LPG Carriers with Internal Polyu-
rethane Insulation. In: The Naval Architect, mai.,
1977.
18. STENA LINES. Stena's Search for Efficiency Wins Savings
from Hull and Engine. In: The Motor Ship, ago., 1986.
19. STRAATEN, J.F. van. Thermal Performance of Buildings.
Elsevier Publishing Company, Londres, 1967.
20. THE AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-
CONDITIONING ENGINEERS, Inc. Papers Presented at the
Symposium on Thermal Insulation at the Semiannual Meet-
ing of the ASHRAE. Columbus, Ohio, 5-8 fev., 1968.