

**FRANCISCO EDUARDO CABRAL GUIMARÃES BESSA**

**LUIZ ALBERTO BRAUD MARQUES CORDEIRO**

*-9,0 (nove ezes)*

**ESTUDO DE ISOLAMENTO TÉRMICO  
PARA ALTAS TEMPERATURAS**

**Projeto de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para obtenção do  
título de Engenheiro Mecânico**

**São Paulo**

**2.000**

**DEDALUS - Acervo - EPMN**



**31600005943**

**FRANCISCO EDUARDO CABRAL GUIMARÃES BESSA  
LUIZ ALBERTO BRAUD MARQUES CORDEIRO**

**ESTUDO DE ISOLAMENTO TÉRMICO  
PARA ALTAS TEMPERATURAS**

**Projeto de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo para obtenção do  
título de Engenheiro Mecânico**

**Orientador:**

**Prof. Adherbal Caminada Netto**

**São Paulo**

**2.000**

Aos 118 corajosos tripulantes naufragos do submarino russo Kursk. Seus nomes sempre nos inspirarão o triunfo da vida sobre a morte, e despertarão indignação pelos que pouco prezam pela vida humana.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao amigo Professor Caminada, que sempre nos inspirou e orientou a buscar e utilizar novos conhecimentos.

A nossos pacientes pais, que sempre acreditaram em nossos potenciais.

A todos os colaboradores deste trabalho.

# **Lista de Tabelas**

## **Parte 1:**

Tabela 4.2 – Eficiência do Isolamento.....	14
--	----

## **Parte 2:**

Tabela 5.2.1.1: 1º interação para determinação da T <sub>sup</sub> do silicato de cálcio.....	39
Tabela 5.2.1.2: 2º interação para determinação da T <sub>sup</sub> do silicato de cálcio.....	39
Tabela 5.2.1.3: 1º interação para determinação da T <sub>sup</sub> da lã de rocha.....	40
Tabela 5.2.1.4: 2º interação para determinação da T <sub>sup</sub> da lã de rocha.....	40
Tabela 5.2.1.5: 1º interação para determinação da T <sub>sup</sub> da fibra de vidro.....	41
Tabela 5.2.1.6: 2º interação para determinação da T <sub>sup</sub> da fibra de vidro.....	41
Tabela 5.2.2.1: Perdas de calor na tubulação com silicato de cálcio.....	42
Tabela 5.2.2.2: Perdas de calor na tubulação com lã de rocha.....	43
Tabela 5.2.2.3: Perdas de calor na tubulação com fibra de vidro.....	43
Tabela 5.2.2.4: Temperaturas na saída da tubulação.....	44
Tabela 5.2.3.1: Custo das perdas de energia para silicato de cálcio.....	46
Tabela 5.2.3.2: Custo das perdas de energia para lã de rocha.....	46
Tabela 5.2.3.3: Custo das perdas de energia para fibra de vidro.....	47
Tabela 5.2.3.4: Custo anual atualizado das perdas de energia por tipo de isolante.....	48
Tabela 5.3.1: Custo dos materiais isolantes.....	50
Tabela 5.3.2: Custo dos materiais de revestimento.....	50
Tabela 5.3.3: Custo dos sistemas isolantes em avaliação.....	51
Tabela 5.3.4: Custo anual atualizado dos sistemas de isolamento.....	52
Tabela 5.4: Soma de custos de perdas e isolamento.....	53
Tabela 5.5: Custo de cada isolamento de acordo com espessura escolhida.....	58
Tabela 7: Diminuição da eficiência do isolamento com aumento da espessura.....	65

# **Lista de Figuras e Gráficos**

## **Parte 1:**

Figura 3.1: Dependência entre a condutividade térmica de alguns sólidos e a temperatura...	06
Figura 4.2: Perda de Calor em Tubos com Temperatura Superficial de 75° C.....	13
Figura 4.3: Composição Gráfica de Custos.....	15
Figura 4.4: Espessura Econômica com Base nos Custos dos Fabricantes.....	17

## **Parte 2:**

Figura 2.1: Esquema de uma Central Térmica.....	23
Gráfico 3.3.1: Calor específico do vapor d'água.....	27
Gráfico 3.3.2: Massa específica do vapor d'água.....	28
Figura 5.2.1: Seção transversal da tubulação com isolamento.....	35
Gráfico 5.2.1: Coef. de condut. térmica para alguns isolantes.....	37
Gráfico 5.4.1: Soma de custos de perdas e isolamento – silicato de cálcio.....	54
Gráfico 5.4.2: Soma de custos de perdas e isolamento – lã de rocha.....	55
Gráfico 5.4.3: Soma de custos de perdas e isolamento – fibra de vidro.....	56
Figura 6.2: Isotubo de lã de rocha one-piece-pipe da Thermax.....	60
Figura 6.3.1: Instalação dos isotubos.....	61
Figura 6.3.2.1: Sobreposição longitudinal.....	62
Figura 6.3.2.2: Sobreposição circumferencial.....	63
Figura 6.3.2.3: Isolamento com revestimento.....	63

## RESUMO

Durante muitos anos, devido à abundância de recursos naturais e humanos e também a pensamentos estáticos, convivemos com enormes ineficiências (desperdícios de energia, exploração do ser humano e poluição).

Hoje em dia sabe-se que a riqueza não vem da abundância de recursos, mas sim da ilimitada capacidade humana de inovar e criar modos mais eficientes de uso dos recursos.

A primeira parte deste projeto consiste de um amplo estudo do método mais comum e utilizado para se reduzir ineficiências no transporte de energia térmica, o isolamento térmico.

Na segunda etapa mostrou-se um caso real em que se busca minimizar os custos da ineficiência no transporte de energia térmica em uma linha de vapor de uma central térmica, usando isolante.

## ABSTRACT

For many years, due to the abundance of natural and human resources and also to static thoughts, we have lived with huge inefficiency (energy, labor exploration and pollution).

Nowadays, it's known that richness does not come from resources abundance, but from the unlimited human capacity to innovate and create efficient ways to use resources.

The first part of this work consists of a wide study about the most usual and used way to reduce inefficiencies on thermal energy transportation, thermal insulation.

The second part consists of a practical case to minimize the cost of inefficiency in the thermal energy transportation in a steam line of a thermal central.

# ÍNDICE

<b><u>PARTE 1 – Estudo Teórico de Isolamento Térmico</u></b>	01
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	02
<b>2. FINALIDADE DO USO DE SISTEMAS ISOLANTES</b>	03
2.1 Motivos econômicos	03
2.2 Motivo de serviço	04
2.3 Proteção Pessoal	04
2.4 Outras Finalidades	04
<b>3. CARACTERÍSTICAS DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS</b>	05
3.1 Sistemas Isolantes	05
3.2 Tipos e Formas	07
3.3 Projeto de Sistemas Isolantes	08
3.4 Novos Estudos Sobre Transferência de Calor em Fibras	09
<b>4. ANÁLISE ECONÔMICA</b>	12
4.1 Conservação de Energia	12
4.2 Benefícios de um Isolamento Térmico	12
4.3 A “Espessura Econômica”	15
4.4 Obtenção da “Espessura Econômica”	16
<b>5. ALGUNS MATERIAIS ISOLANTES</b>	18
5.1 Materiais Encontrados em Forma de Calhas e de Segmentos Pré-Moldados	18
5.2 Materiais Encontrados em Forma de Lençóis e Fios	20

## **PARTE 2 – Projeto de Isolam. para Linha de Vapor.....21**

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>22</b>
<b>2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....</b>	<b>23</b>
2.1 Enunciado do Problema.....	23
<b>3. ESTUDO DAS PERDAS DE CALOR NA LINHA DE VAPOR....</b>	<b>25</b>
3.1 Algumas Considerações sobre o Escoamento.....	25
3.2 Perdas de Calor no Tubo Nu.....	25
3.3 Temperatura na Saída do Tubo.....	26
<b>4. FUNÇÕES E PROPRIEDADES DO SISTEMA ISOLANTE.....</b>	<b>30</b>
4.1 Funções do Sistema de Isolamento.....	30
4.2 Propriedades do Sistema de Isolamento.....	30
4.3 Pré Seleção de Materiais.....	31
<b>5. Escolha do Material Isolante e da Espessura.....</b>	<b>33</b>
5.1 Considerações.....	33
5.2 Custo das Perdas de Energia.....	34
5.2.1 Temperatura na Superfície de Isolamento.....	34
5.2.2 Perdas de Energia.....	42
5.2.3 Custo da Energia Perdida.....	44
5.3 Custo do Sistema de Isolamento.....	49
5.4 Determinação da Espessura Econômica.....	52
5.5 Determinação do Material.....	57
<b>6. INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE ISOLAMENTO.....</b>	<b>59</b>

6.1	Preparação da Tubulação.....	59
6.2	Materiais.....	59
6.3	Instalação.....	61
6.3.1	Fixação dos Tubos Isolantes.....	61
6.3.2	Fixação do Revestimento.....	62
7.	BIBLIOGRAFIA.....	64
8.	CONCLUSÃO.....	66

**PARTE 1:**

**ESTUDO TEÓRICO DE**

**ISOLAMENTO TÉRMICO**

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento exponencial da população mundial e consequente progresso do setor industrial, torna-se cada vez mais importante os estudos de medidas para se economizar energia. Dentre destas várias medidas, os isolamentos térmicos têm se apresentado com grande eficácia e custo aceitável.

Este trabalho visa o estudo de sistemas de isolamento térmico para tubulações, fornos e equipamentos a elevadas temperaturas, analisando desde o surgimento da necessidade de se conservar energia até a escolha do material (ou gama de materiais) mais adequado para o isolamento, incluindo análises de redução de custos e estudos de diversos isolantes, com suas vantagens e limitações.

São utilizados como fontes para a elaboração deste trabalho materiais colhidos através de pesquisas na rede Internet e de visitas à empresas da área de isolamento térmico, além de bibliografia existente sobre o assunto.

## 2. FINALIDADE DO USO DE SISTEMAS ISOLANTES

Todos os isolamentos térmicos têm por finalidade geral reduzir as trocas de calor de um sistema para o meio ambiente, ou vice-versa. Desse fato, decorrem duas classes gerais de isolamentos térmicos:

- Isolamentos para sistemas quentes, isto é, cujas temperaturas sejam superiores à temperatura ambiente.
- Isolamentos para sistemas frios, isto é, cujas temperaturas sejam inferiores à temperatura ambiente.

Tanto para sistemas quentes como para os frios, o isolamento térmico pode ser usado por diversas razões, com finalidades específicas diferentes, que são as seguintes:

### 2.1 Motivos Econômicos

As perdas de calor ou de frio, de um sistema para o exterior, representam um desperdício do combustível utilizado no aquecimento ou da energia gasta na refrigeração. O emprego do isolamento térmico resulta portanto em economia de combustível ou energia.

## 2.2 Motivos de Serviço

Em muitos casos, independentes de razões econômicas, o isolamento térmico deve ser aplicado por exigências da natureza do serviço, seja, por exemplo, para manter um fluido de uma tubulação em uma determinada temperatura, ou para conseguir que esse fluido possa chegar ao destino com a temperatura desejada. Sempre que, na obtenção de um produto, tiverem que ser mantidas temperaturas diferentes da temperatura ambiente, o isolamento térmico passa a ser parte integrante do equipamento e, consequentemente, do processo de produção. Dessa forma, os isolantes térmicos são utilizados em praticamente todas as indústrias.

## 2.3 Proteção Pessoal

O isolamento térmico pode também ser necessário para evitar queimaduras em alguém que encoste em determinada tubulação ou forno, e também para evitar o desconforto da excessiva irradiação de calor.

## 2.4 Outras Finalidades

O isolamento térmico ainda desempenha funções de absorção acústica e de proteção contra incêndios.

### 3. CARACTERÍSTICAS DOS ISOLAMENTOS TÉRMICOS

#### 3.1 Sistemas Isolantes

Os isolamentos térmicos são constituídos por materiais de condutividade térmica baixa, sozinhos ou combinados, a fim de se obter baixo fluxo térmico para os sistemas.

Nos isolamentos térmicos constituídos por *fibras*, por *pós* ou por *escamas*, o material sólido está finamente disperso num espaço cheio de ar. Estes sistemas caracterizam-se por uma *condutividade térmica efetiva*, que depende da condutividade térmica e das propriedades radiativas da superfície do material sólido, e também da natureza e da fração volumar do ar ou do espaço vazio. Um parâmetro especial do sistema é a *densidade mássica* (massa do sólido / volume total), que depende bastante da maneira pela qual o material sólido está ligado.

Quando se formam pequenos espaços vazios, ou ocos, mediante a adesão ou a fusão de parte do material sólido, constitui-se uma matriz rígida. Quando estes espaços estão isolados uns dos outros, o sistema é denominado isolamento celular. Exemplos desses isolamentos rígidos são os sistemas de *espumas*, especialmente os constituidos por materiais plásticos ou vítreos. Os isolamentos *refletivos* são compostos por multicamadas de folhas ou de películas delgadas; as camadas têm elevada refletividade e estão espaçadas para refletir o calor radiante de volta para a fonte emissora. O espaçamento

entre as camadas é calculado a fim de restringir o movimento do ar entre elas e, nos isolamentos de alto desempenho, o espaço é evacuado. Em todos os tipos de isolamento, o evacuamento do ar nos espaços vazios reduz a condutividade térmica efetiva do sistema.

É importante reconhecer que a transferência de calor através de qualquer sistema de isolamento inclui diversos modos: a condução através dos materiais sólidos, a condução ou a convecção através do ar nos espaços vazios, e, se a temperatura for suficientemente elevada, a troca radiativa entre as superfícies da sólida. A condutividade térmica efetiva leva em conta todos estes processos, e os valores de alguns sistemas isolantes escolhidos estão resumidos na tabela 3.1.

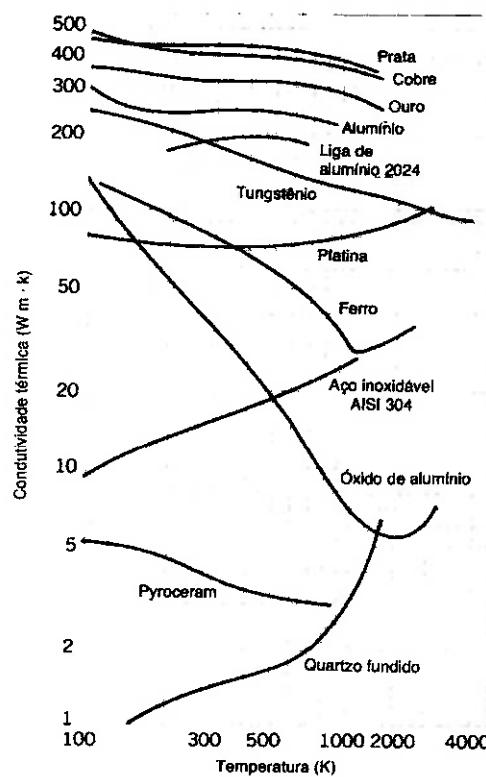


Figura 3.1: Dependência entre a condutividade térmica de alguns sólidos e a temperatura

### 3.2 Tipos e Formas

Existem vários materiais utilizados como isolantes térmicos; porém, como as características desses isolantes são fundamentalmente determinadas por sua composição, podemos dividi-los em cinco tipos principais:

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

Quanto à comercialização dos isolantes térmicos, estes costumam ser fornecidos 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, etc.),
- Mantas (revestidas com tela metálica, etc.),
- Dutos pré-moldados,
- Flocos,
- Cordões e tiras,
- Isolamentos projetados, e

- Formas especiais (luvas, módulos, etc.).

O grande número de tipos e formas com que são fornecidos os materiais isolantes térmicos permite ao utilizador selecionar materiais cujas propriedades variam bastante, o que é desejável, já que os requisitos de cada projeto variam amplamente. Assim, a correta verificação das propriedades dos diversos materiais isolantes é de grande importância econômica para a instalação, vida útil e eficiência térmica do sistema de isolamento térmico.

### **3.3 Projeto de Sistemas Isolantes**

Para se projetar um sistema de isolamento de temperatura, pode-se seguir as seguintes etapas:

- A) Estabelecimento dos requisitos e das funções básicas que o sistema deverá desempenhar, como por exemplo, conservar energia, manter a temperatura em um espaço, retardar variações de temperatura em um recipiente, prover proteção contra incêndio, etc.,
- B) Determinação das propriedades dos materiais isolantes, de revestimento, de vedação e de fixação necessárias para satisfazer os requisitos do sistema (faixa de temperaturas de operação, requisitos mínimos de choque térmico, difusividade térmica, faixa de calores específicos dos materiais, emissividade superficial dos materiais de revestimento, além de tipo (rígido, semi-rígido, etc.), resistência

mecânica (flexão, torção, etc.), resistência a vibrações e a choques, estabilidade dimensional, etc.),

- C) Seleção dos materiais (partindo das propriedades definidas) que atendam os requisitos do sistema e que basicamente serão de quatro tipos: isolantes (para resistir ao fluxo de calor), de revestimento (cobertura colocada sobre o isolante), de fixação (são os diversos itens usados para prender o isolante à superfície a se isolada) e de vedação (compostos aplicados ao revestimento a fim de impedir que fluidos atravessem o revestimento e penetrem no isolante),
- D) Determinação da espessura de isolamento necessária (que será analisada mais detalhadamente no capítulo seguinte), e
- E) Projeto físico do sistema.

### 3.4 Novos Estudos Sobre Transferência de Calor em Fibras

Os materiais fibrosos são eficientes isolantes térmicos a alta temperatura devido ao alto poder das fibras em evitar transferências de energia radiativa por absorção e difusão e, reduzir a condução térmica através dos tortuosos caminhos pela matriz da fibra. Embora a temperaturas moderadas a fração radiativa sobre a total ( de transferência de calor) seja extremamente diferente da morfologia isolante e do ambiente de operação (como vácuo ou gás ), a radiação é tipicamente o maior modo de transferencia

de calor em isolantes altamente porosos operando a temperatura acima de 400-500K.

Enquanto a seleção do tipo da fibra do isolante para aplicações específicas depende da temperatura e do ambiente como também do peso das exigências estruturais a compreensão precisa do transporte por radiação essencial para otimização do projeto térmico. Isso se aplica a ambos, materiais super-leves de alta porosidade que contêm fibras esparsamente empacotadas e aleatoriamente orientadas tanto quanto meios de alta densidade que apresentam fibras compactadas e alinhadas. As diferentes magnitudes de separação das fibras levam a diferentes fenômenos de difusão que devem ser corretamente considerados para a análise da transferência de calor por radiação.

A transferência radioativa por meios fibrosos tem sido assunto de interesse por muitos anos. Primeiros estudos geralmente abordavam a transferência de calor por radiação através de aproximações semi empíricas. A aplicação desse método é limitada devido a necessidade de experimentos para cada tipo de fibra, para determinar os parâmetros empíricos. Estudos posteriores usavam a teoria da difusão para isolar um elemento cilíndrico para calcular as propriedades radiativas de uma única fibra. Ambos estudos usaram coeficientes de aproximação de difusão baseados em Planck e Rosseland. A influência da morfologia do material, como orientação das fibras e a exata função de difusão, não era considerada nesses modelos.

Devido a forma das fibras nos isolantes térmicos (alguns milímetros de comprimento e alguns micrômetros de diâmetro) elas se comportam como difusores radiativos em duas dimensões. As características

de difusão e absorção de isolantes fibrosos são altamente influenciadas pela orientação das fibras. Modelos de radiação que consideram a orientação das fibras foram desenvolvidos por Lee (VER BIBLIOGRAFIA) e mostram que os coeficientes de difusão são funções da direção de incidência e da orientação das fibras. O efeito da orientação é maior quando as fibras estão alinhadas em direções preferenciais (para fibras aleatoriamente orientadas as propriedades radiativas se tornam independente da direção de incidência).

## 4. ANÁLISE ECONÔMICA

### 4.1 Conservação de Energia

Grande parte da energia que utilizamos hoje em dia provém de fontes primárias não-renováveis como o petróleo, o carvão e o gás natural. Isso leva o mundo a repensar com seriedade as maneiras de se utilizar essa energia disponível evitando seus desperdícios, a um custo razoável.

O isolamento térmico é, sem dúvida, uma das maneiras eficazes de se eliminar desperdícios de energia, e inclusive pode-se ler no prefácio da norma britânica BS 5422 – Especificação para o Emprego de Materiais Isolantes Térmicos – o trecho transscrito a seguir:

“Observe-se que as espessuras recomendadas nas tabelas para conservação de calor são apreciavelmente maiores do que aquelas que constavam das normas anteriores. Isto se deve à urgente necessidade de preservar as reservas de energia...”.

## 4.2 Benefícios de um Isolamento Térmico

A figura 4.2, calculada para diversas espessuras de calhas isolantes de silicato de cálcio livre de amianto, ar ambiente a 20° C e convecção natural, mostra a ponderável quantidade de energia térmica economizada mediante o emprego de isolante térmico em canalizações e equipamentos industriais.

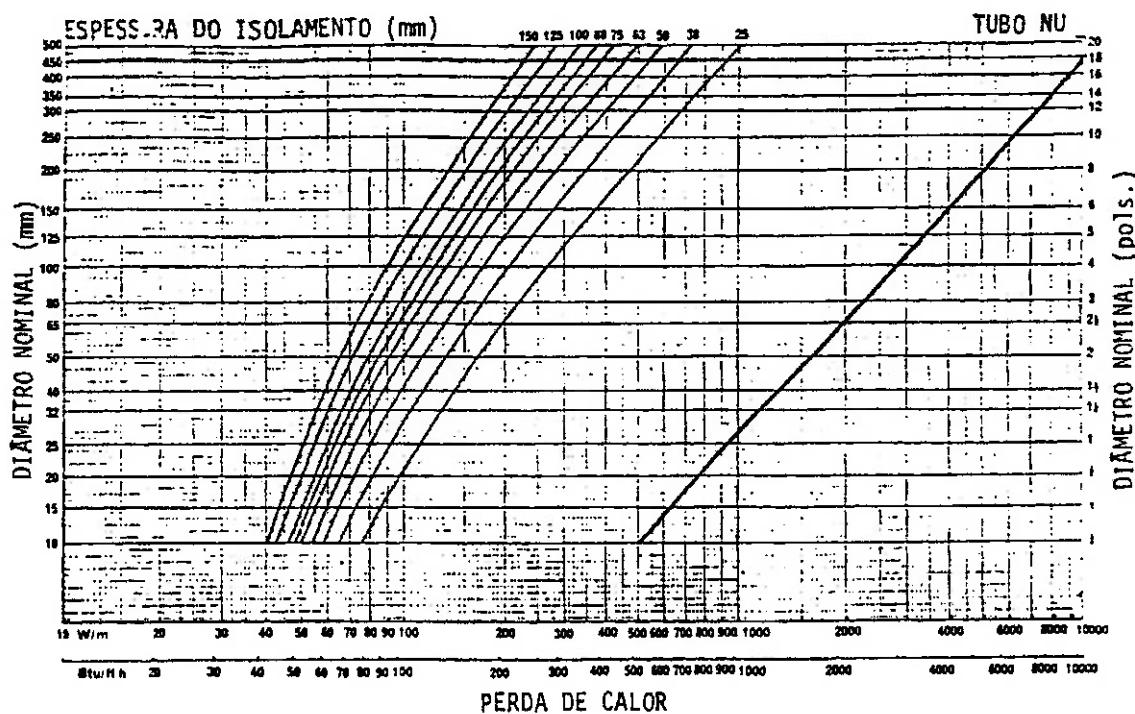


Figura 4.2 – Perda de Calor em Tubos com Temperatura Superficial de 75° C

Pela figura 4.2, verifica-se que o aumento progressivo da espessura do isolante reduz a perda de calor, e consequentemente a quantidade de combustível necessária para manter a temperatura de operação.

Ao mesmo tempo que isso gera uma economia no gasto com combustível, se introduz um novo fator no balanço de custos: o custo com o sistema de isolamento.

Para cada camada de isolante acrescentada, pode-se definir a eficiência do sistema isolante como sendo:

$$\text{Eficiência} = \frac{q_o - q}{q_o} = \frac{\text{Perdas sem isolamento} - \text{Perdas com isolamento}}{\text{Perdas sem isolamento}}$$

A tabela 4.2, elaborada a partir da figura 4.2 e da fórmula da eficiência, demonstra a necessidade de não se deixar certos sistemas aquecidos sem isolamento, pois uma simples camada de 25 mm (1 pol.) de isolante na canalização exemplificada proporciona uma redução de 90% nas perdas de energia.

$\Delta X$ pol.	mm	$q'$	$q'_o - q'$	Eficiência (%)	Acréscimo (%)
0	0	2000	----	----	----
1	25	200	1800	90,00	90,00
2	50	130	1870	93,50	3,50
3	75	105	1895	94,75	1,25
4	100	90	1910	95,50	0,75

Tabela 4.2 – Eficiência do Isolamento

Duas outras conclusões importantes devem ser tiradas das análises dos dados da tabela 4.1. Em primeiro lugar, que o acréscimo de eficiência é decrescente para cada camada adicionada. Em segundo, que por maior que seja a espessura da camada isolante, sempre haverá, mesmo que ínfima, uma certa perda de energia.

### 4.3 A “Espessura Econômica”

Assim como a toda quantidade de energia economizada pode ser atribuído um custo, os sistemas de isolamento térmico também têm seu custo, tudo isso para diferentes espessuras utilizadas no isolamento. A figura 4.3 ilustra essa composição de custos de maneira gráfica, com a curva (Q) representando o custo das perdas de energia, a curva (I) representando o custo do sistema isolante, e a curva (T) correspondendo à soma dos custos (Q) e (I).

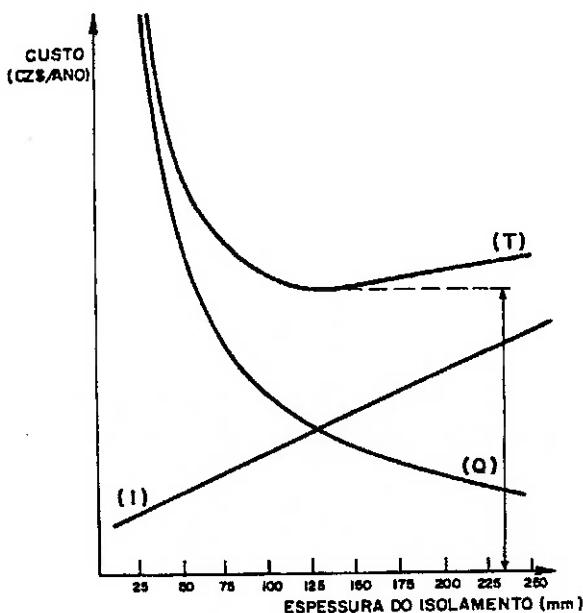


Figura 4.3 – Composição Gráfica de Custos

A curva do custo total (T) apresenta um ponto mínimo, que representa o que costuma ser chamada de “espessura econômica” para o sistema de isolamento empregado.

#### 4.4 Obtenção da “Espessura Econômica”

Na prática, as curvas apresentadas no item anterior, bem como a “espessura econômica”, são pouco utilizadas devido à pouca confiabilidade dos métodos recomendados para se obter as curvas (Q) e (I), os quais exigem enorme conhecimento da composição de custos e capacidade de fazer projeções para se determinar o custo de energia ao longo do período de depreciação considerado.

Um método mais recente e eficiente foi sugerido por Peter Harris, Diretor de Serviços da Associação de Utilizadores de Energia do Reino Unido, método que não é tão sensível às hipóteses feitas principalmente para a obtenção da curva (Q).

O ponto mínimo que se quer encontrar ocorre quando a curva do custo das perdas de energia (Q) e a curva do custo do isolamento (I) possuem inclinações idênticas e de sinal contrário. 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 assumidas para elaboração da curva (Q).

Se a curva (I), no entanto, for poligonal (o que é mais próximo da realidade, pois os fabricantes só produzem materiais isolantes em espessuras discretas – 1 pol., 2 pol., 3 pol., etc. – e também não cobram segundo uma escala contínua, mas como uma linha quebrada ascendente) e mudar abruptamente de inclinação a cada trecho, haverá um ponto preciso em que sua inclinação corresponderá à inclinação da curva (Q), formando um mínimo bem definido. Isso está mostrado na figura 4.4, onde se verifica que, embora sejam considerados períodos diferentes de avaliação, o mínimo aparece sempre na mesma espessura. O mesmo resultado seria obtido se o período de avaliação fosse mantido constante e o custo de combustível aumentado, ou se a temperatura de operação fosse aumentada mantendo-se os outros parâmetros constantes.

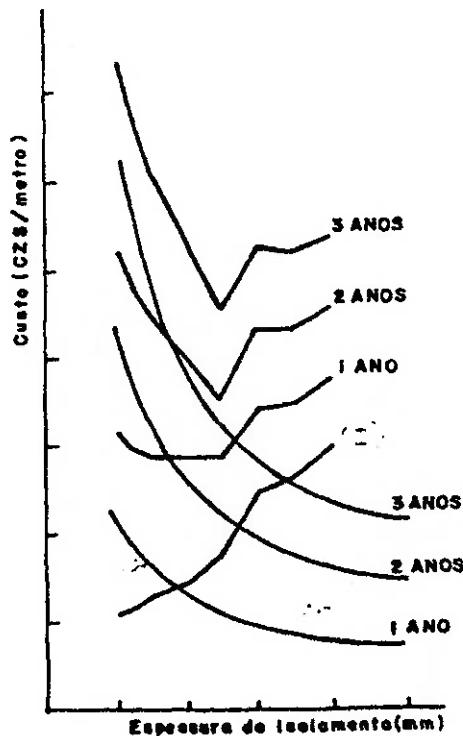


Figura 4.4 – Espessura Econômica com Base nos Custos dos Fabricantes

O aspecto mais interessante deste método é que nem é mesmo 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”.

## 5. ALGUNS MATERIAIS ISOLANTES

Segue a seguir alguns exemplos de materiais utilizados em isolamentos térmicos para tubulações. Estão divididos em: materiais encontrados em forma de calhas e de segmentos pré-moldados, e materiais encontrados em forma de lençóis e fios.

## 5.1 Materiais Encontrados em Forma de Calhas e de Segmentos Pré-Moldados

Hidrossilicato de cálcio – É atualmente o material de emprego mais difundido para o isolamento de tubulações industriais, na faixa de temperaturas de trabalho de 0° C até 650° C. O material é reforçado com fibras de amianto, que além de contribuírem também para o isolamento térmico, servem para dar maior resistência mecânica à composição. O hidrossilicato de cálcio é imune à ação da água, e tem boa resistência à compressão e à flexão. Esse material está especificado nas normas P.NB-141 e P.EB-221 da ABNT, e C-345 da ASTM.

Composição de magnésia 85% e amianto 15% – Era o material de emprego tradicional antes do aparecimento do hidrossilicato de cálcio, sendo ainda bastante usado. A faixa de temperaturas de trabalho vai de 0° C a 320° C, e a condutividade térmica é equivalente à do hidrossilicato de cálcio. Não tem boa resistência à ação da água e da umidade. Esse material está especificado na norma C-320 da ASTM.

Sílica diatomácea – É um material cuja faixa de temperaturas de trabalho vai até 1.000° C, sendo empregado principalmente para temperaturas acima do limite de uso do hidrossilicato de cálcio, por ser de preço bem mais elevado do que este. A sílica diatomácea é em geral

misturada também com fibras de amianto para melhorar a resistência mecânica.

Lã mineral (sílica em fios) – Material muito bom, com ótima resistência à água e à umidade, podendo ser empregado para temperaturas desde -100° C até 900° C. O seu uso é limitado devido ao alto preço.

Espuma de plástico (poliestireno) – É o material de emprego mais comum no isolamento para baixas temperaturas, tendo faixa de trabalho desde -130° C até 100° C. Tem excelente resistência à água e à umidade, e boas qualidades mecânicas.

Cortiça natural – A cortiça natural era o material de uso corrente para o isolamento de linhas frias até o aparecimento da espuma de plástico. A faixa de temperaturas de trabalho vai desde de -130° C a 150° C. Resiste bem à água, à umidade e às vibrações. A cortiça apresenta-se em geral granulada e aglutinada com um aglomerante também isolante térmico.

Lã de vidro – Tem excelente resistência à água e à umidade. A faixa de temperaturas de trabalho é de 0° C a 230° C. O manuseio com este material é perigoso, requerendo por isso cuidados especiais.

## 5.2 Materiais Encontrados em Forma de Lençóis e Fios

Amianto em tecido e em fios – Materiais usados para o isolamento de tubulações pouco importantes, com temperaturas até 150° C, ou para recobrir outros materiais isolantes.

Lã de vidro e lã mineral em lençóis – Mesmos usos e limitações  
das calhas pré-moldadas destes materiais.

## **PARTE 2:**

# **PROJETO DE ISOLAMENTO PARA LINHA DE VAPOR**

## 1. INTRODUÇÃO

A segunda etapa deste Trabalho consiste no projeto de um sistema de isolamento térmico a altas temperaturas para uma situação real de necessidade numa indústria.

A idéia básica é de se utilizar os conhecimentos teóricos adquiridos nos estudos da primeira parte do Trabalho juntamente com catálogos e informações colhidas sobre isolantes térmicos, para uma aplicação no campo prático desses materiais, hoje em dia tão requisitados.

## 2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Aqui se irá apresentar qual é o problema real de necessidade de isolamento térmico que será analisado.

Deve-se citar que esse problema é foi “criado” pelos dois estudantes elaboradores desse Trabalho, com a colaboração de alguns profissionais do ramo de instalações industriais, de modo que o problema estivesse nos moldes de casos reais existentes em diversas indústrias (químicas, têxteis, etc.).

### 2.1 Enunciado do Problema

Deverá ser projetado um sistema de isolamento térmico para uma tubulação – linha de vapor d’água – de uma central térmica. Essa tubulação parte de uma caldeira e segue até uma turbina, onde o vapor d’água é convertido em energia mecânica. Segue abaixo um esquema (Figura 1) do ciclo termodinâmico.

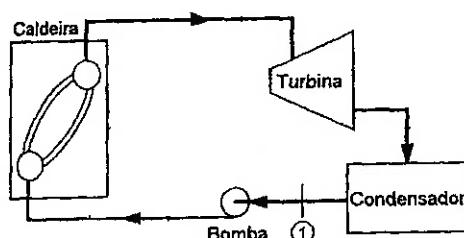


Figura 2.1: Esquema de uma Central Térmica

Irá se tratar apenas da tubulação do sentido caldeira – turbina, deixando o estudo dos dutos do fluxo de fluido de volta à caldeira para outra oportunidade.

A seguir estão definidas as condições na qual o sistema opera:

- **CALDEIRA**

Flamotubular,

Alimentada por gás natural;

Opera 8h/dia, 260 dias/ano;

Gera vapor d'água saturado a 180°C, velocidade do vapor de 20 m/s;

Rendimento:  $\eta = 30\%$ .

- **TUBULAÇÃO**

Material: aço carbono;

Comprimento: 100m;

Diâmetro: 4" (0,1016mm).

- **TURBINA**

Para seu bom desempenho, o vapor não deve chegar a menos de 170°C.

### 3. ESTUDO DAS PERDAS DE CALOR NA LINHA DE VAPOR

#### 3.1 Algumas Considerações sobre o Escoamento

Para análise e cálculos sobre o escoamento do vapor d'água na tubulação, foram tomadas algumas hipóteses, listadas abaixo:

- As condições são de regime permanente (com variações desprezíveis de energia cinética e potencial);
- A resistência térmica na parede do duto é desprezível (o que torna a temperatura na superfície do tubo nu igual à temperatura do vapor d'água no interior);
- A temperatura ambiente foi considerada zero°C (inverno rigoroso);
- Foi utilizado um coeficiente global de transferência de calor convetivo e radiativo:  $h_o = 15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Esse valor foi retirado de uma média entre vários coeficientes globais de transferência de calor convetivo e radiativo encontrados em exemplos semelhantes ao caso em estudo.

#### 3.2 Perda de Calor no Tubo Nu

Considerando a tubulação nua, ou seja, sem nenhuma camada de isolamento térmico, pode-se determinar a perda de calor por metro de comprimento de tubulação pela relação:

$$Q'1 = Q'_{\text{convecção}} + Q'_{\text{radiação}} = h_o \times 2 \times \pi \times R_{\text{nu}} \times (T_{\text{sup}} - T_{\text{amb}}) \text{ (W/m)} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$Q'_1$  → Perda de calor por metro de tubulação sem isolamento (W/m)

$h_o$  → Coef. global de transf. calor por convecção e radiação (W/m<sup>2</sup>.K)

$R_{nu}$  → Raio do tubo nu (m)

$T_{sup}$  → Temperatura na superfície do tubo nu (K)

$T_{amb}$  → Temperatura ambiente (K)

Substituindo as variáveis pelos seus respectivos valores ( $h_o = 15$  W/m<sup>2</sup>.K,  $R_{nu} = 0,0508$  m,  $T_{sup} = 453$  K e  $T_{amb} = 273$  K), obtém-se o valor  $Q'_1 = 861,8$  W/m, que representa a perda de calor por metro de tubulação nua.

Vale a pena ressaltar aqui que esse valor  $Q_1$  encontrado está dentro do previsto em tabelas de perda de calor em função da temperatura, o que já era esperado já que se tomou o cuidado de escolher valores adequados para as variáveis da equação.

### 3.3 Temperatura na Saída do Tubo

Para determinação da temperatura do vapor d'água na saída dos 100 metros de tubulação, ou seja, na entrada da turbina, realiza-se o balanço de energia para todo o tubo:

$$Q_1 = m' \times c_p \times (T_i - T_f) \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$Q_1$  = Perda de calor em toda tubulação (W)

$m'$  → Vazão mássica do vapor d'água

$c_p$  → Calor específico do vapor saturado d'água

$T_i$  → Temperatura do vapor no início da Tubulação (K ou °C)

$T_f$  → Temperatura do vapor no final da Tubulação (acompanha unidade de  $T_i$ )

### Cálculo de $Q_1$ :

$$Q_1 = Q'_1 \times (\text{comprim. da tubulação}) = Q'_1 \times 100 \rightarrow Q_1 = 86.180 \text{ W}$$

### Cálculo de $c_p$ :

Para obtenção desse valor é necessária a consulta ao gráfico abaixo, que foi confeccionado baseado em tabelas de propriedades termofísicas da água (como vapor saturado).

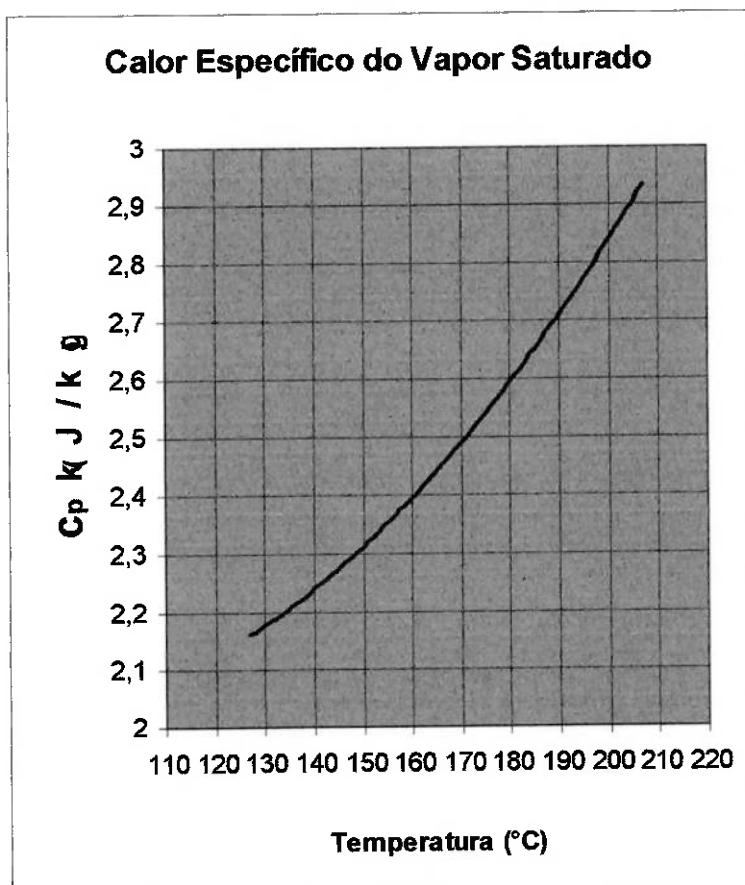


Gráfico 3.3.1: Calor específico do vapor d'água

Para encontrar o valor de  $c_p$  foi considerada a temperatura de 180°C. Então, consultando o Gráfico 3.3,  $c_p = 2,6 \text{ kJ/kg.}^{\circ}\text{C}$ , ou  $c_p = 2.600 \text{ J/Kg.K}$

Cálculo de  $m'$ :

Para calcular-se a vazão mássica  $m'$ , deve-se antes determinar a massa específica  $\rho$  do vapor. Para obtenção desse valor é necessária a consulta ao gráfico abaixo, também criado se baseando em tabelas de propriedades termofísicas da água (como vapor saturado).

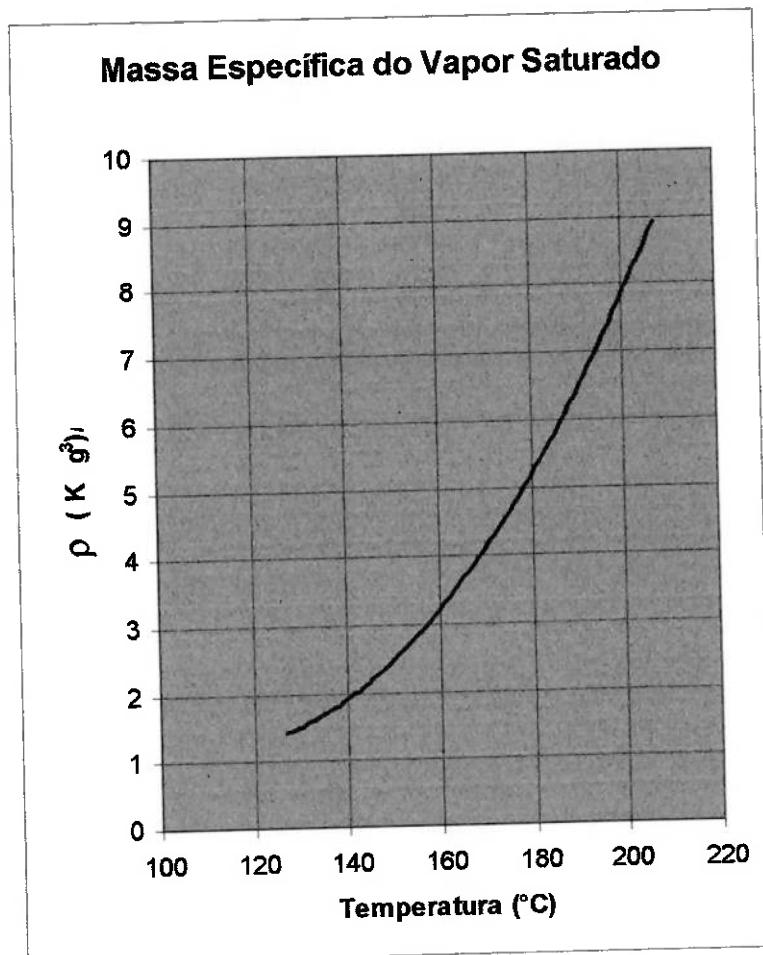


Gráfico 3.3.2: Massa específica do vapor d'água

Consultando o Gráfico 3.3.2 para 180°C, encontra-se  $\rho = 5,1 \text{ kg/m}^3$ .

Daí:

$$m' = (\text{velocidade do vapor na tubulação}) \times (\text{área da seção}) \times \rho \quad (\text{Eq. 3})$$

A velocidade foi informada no começo; é igual a 20 m/s. A área da seção é calculada com a equação abaixo:

$$\text{Área da seção} = \pi \times (\text{raio da tubulação})^2 \quad (\text{Eq. 4})$$

Utilizando o raio = 0,0508m, obtém-se que a área é igual a 0,008107 m<sup>2</sup>.

Finalmente encontrando m':

$$m' = 20 \times 0,008107 \times 5,1 \rightarrow m' = 0,83 \text{ kg/s}$$

Voltando para a equação do balanço de energia (eq. 2), pode-se agora (que já estão determinados  $Q_1$ ,  $m'$ ,  $c_p$ , e sabendo que  $T_i = 180^\circ\text{C}$ ) determinar a temperatura na saída da tubulação:

$$T_f = T_i - [Q_1 / (m' \times c_p)] \rightarrow T_f = 140^\circ\text{C}.$$

## 4. FUNÇÕES E PROPRIEDADES DO SISTEMA ISOLANTE

### 4.1 Funções do Sistema de Isolamento

Como visto na seção 3.3, existe a necessidade de se utilizar isolamento térmico nessa tubulação para se alcançar a temperatura desejada na turbina (170°C, contra 140°C atingidos sem isolamento), ou seja, retardar as variações de temperatura ao longo da tubulação. Essa pode ser considerada a primeira função do isolante nessa central térmica.

Outra função que o isolamento terá é então a de conservar energia, evitando desperdícios (o que é muito importante devido aos atuais problemas de escassez de energia) e economizando nos custos com alimentação da caldeira.

Como os processos dessa central de vapor ocorrem a altas temperaturas, e alguns trechos da tubulação se localizam em áreas de trânsito de funcionários, surge outra função do isolamento: proteger o pessoal contra risco de queimaduras.

Por fim, mais uma função do sistema de isolamento é a de proteger a tubulação contra danos em caso de incêndios.

### 4.2 Propriedades do Isolante

Levando em conta as funções que o isolamento deverá exercer, surgem algumas propriedades que o material a ser usado deverá possuir.

Para minimizar as perdas de calor ao longo da tubulação, garantir a temperatura na turbina, e evitar altas temperaturas na superfície da tubulação o material deverá ter baixa condutividade térmica.

O material deve se comportar como uma barreira contra o fogo em caso de incêndio, e portanto possuir incombustibilidade.

Além das características acima, o material a ser usado deverá oferecer boa resistência mecânica (para não ser prejudicado no caso de vibrações no escoamento na tubulação) e também boa resistência à água para não comprometer sua resistência térmica.

Também se deve cuidar para que o material isolante não ataque quimicamente à superfície com a qual manterá contato, ou seja, deve possuir inércia química.

Além das propriedades acima, deve-se verificar se o material existe no formato adequado para sua instalação na tubulação, e se ele pode ser utilizado na faixa de temperatura de 180°C

Finalmente, há a necessidade de se proteger a integridade física do material isolante (contra chuva, danos mecânicos, radiação solar, etc.) e evitar ao máximo que ele entre em contato com água. Por esse motivo torna-se preciso o uso de um revestimento, instalado sobre o isolamento, protegendo-o.

#### **4.3 Pré-Seleção de Materiais**

Na busca de materiais que possuam as propriedades anteriormente mencionadas se encontram os materiais isolantes já geralmente conhecidos. São eles: **silicato de cálcio, fibra de vidro, lã de rocha e fibra de cerâmica.**

Quanto ao revestimento do isolante, os materiais que podem exercer essa função também são os já conhecidos no mercado: **chapas de alumínio (liso ou corrugado) ou de aço carbono galvanizado.**

## 5. ESCOLHA DO MATERIAL ISOLANTE E DA ESPESSURA

### 5.1 Considerações

Nesse ponto deve-se refinar a lista de materiais pré-selecionados.

Como o “equipamento” a ser isolado é relativamente simples, não há a necessidade de um isolamento composto por 2 ou mais tipos de isolantes, devendo então ser selecionado apenas um material isolante dentro da lista de 4 tipos de isolantes anteriormente já citada.

Esse refinamento será feito levando em consideração a economia de custos com perdas de energia e os gastos na instalação que cada tipo de isolante irá proporcionar, levando em conta a espessura econômica a ser utilizada para cada um dos materiais.

Para a realização desse estudo de custos, associou-se previamente cada isolante com um material de revestimento.

Na análise de isolamento com silicato de cálcio considerou-se o revestimento com chapa de alumínio corrugado (0,15 mm espessura), que é um revestimento um pouco mais delicado que os outros e apropriado ao silicato, já que este isolante possui boa resistência mecânica.

Para lã de rocha e fibra de cerâmica associou-se revestimento com chapas galvanizadas (0,3 mm espessura), mais resistentes que alumínio

corrugado e mais adequado à lã de rocha e a fibra de vidro que possuem resistência mecânica inferior ao silicato.

Quanto à fibra de cerâmica, não foi inclusa nas análises de custo, visto que seu custo é muito mais elevado (por ser um material que isola temperaturas até 1.500°C, contra uma média de 600°C para os outros 3 isolantes em análise), e sua condutibilidade térmica é razoavelmente parecida com a dos seus materiais concorrentes (0,058 W/m.K contra uma média de 0,066 W/m.K dos outros três materiais).

## 5.2 Custo das Perdas de Energia

Para determinação desse custo é necessário seguir alguns passos:

- Determinação da temperatura na superfície do isolamento para cada espessura de isolamento de cada um dos materiais candidatos;
- Determinação da perda de calor ao longo da tubulação para cada espessura isolamento de cada um dos materiais candidatos;
- Determinação do custo da perda de calor ao longo da tubulação para cada espessura isolamento de cada um dos materiais candidatos.

### 5.2.1 Temperatura na Superfície de Isolamento

Para calcular a temperatura na superfície do isolamento pode-se usar da seguinte relação, baseada na Figura 5.2.1.

$$Q'_{\text{condução}} = Q'_{\text{convecção}} + Q'_{\text{radiação}} \text{ (W/m)} \quad (\text{Eq. 5})$$

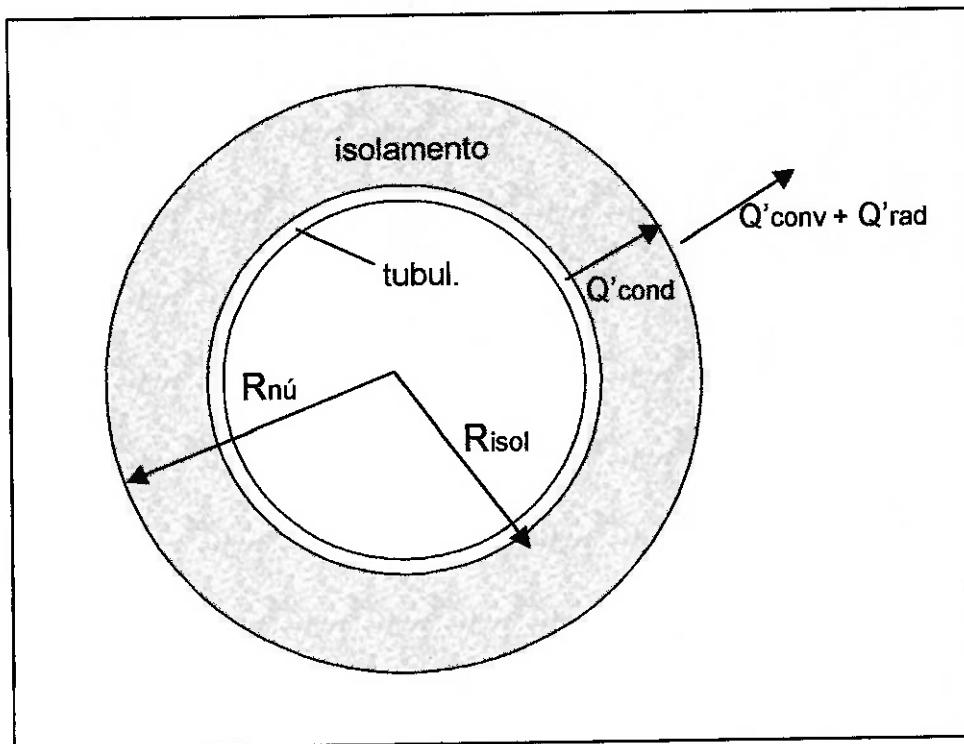


Figura 5.2.1: Seção transversal da tubulação com isolamento

A condução de calor  $Q'_{\text{cond}}$  pode ser expressa pela equação:

$$Q'_{\text{cond}} = (T_{\text{int}} - T_{\text{sup}}) \times k \times 2 \times \pi / \ln(R_{\text{isol}}/R_{\text{nú}}) \text{ (W/m)} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

$T_{\text{int}}$  → Temperatura no interior do tubo (K)

$T_{\text{sup}}$  → Temperatura na superfície do tubo (no isolamento) (K)

$k$  → Coeficiente de condutibilidade térmica do material isolante (W/K.m)

$R_{isol}$  → Raio da tubulação com isolamento

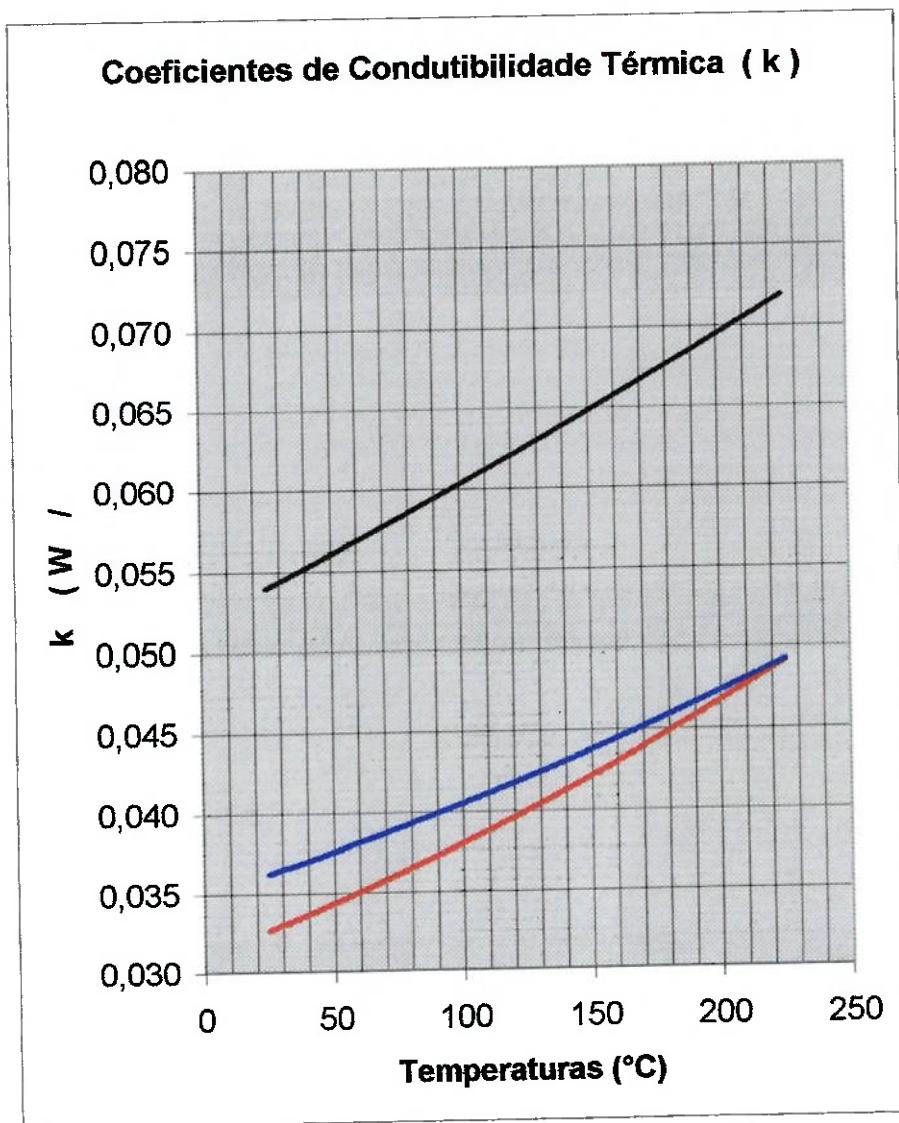
$R_{nú}$  → Raio da tubulação nua

A convecção e a radiação podem ser descritas conforme a Equação 1, levando-se em conta que o raio agora é maior e a temperatura na superfície será diferente (essa temperatura é o que se quer determinar).

Portanto, a relação da Equação 5 fica:

$$(T_{int} - T_{sup}) \times k \times 2 \times \pi / \ln(R_{isol}/R_{nú}) = h_o \times 2 \times \pi \times R_{isol} \times (T_{sup} - T_{amb}) \quad (\text{Eq. 7})$$

Para encontrar a  $T_{sup}$  pela Equação 7 precisa-se obter o valor de  $k$  (coeficiente de condutibilidade térmica – W/m.K) para cada material, nas temperaturas adequadas. Faz-se o uso então do Gráfico 5.2.1, a seguir.



\_\_\_\_\_

**Silicato de Cálcio**

\_\_\_\_\_

**Lã de Rocha**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Fibra de Vidro**

Gráfico 5.2.1: Coef. de condut. térmica para alguns isolantes

No estudo de cada material, para encontrar  $T_{sup}$  para cada espessura de isolamento é necessário realizar duas interações de cálculos, com a Equação 7.

Na primeira, estimou-se uma  $T_{sup,1} = 150^\circ\text{C}$  para se obter uma temperatura média  $T_{med,1}$  entre a temperatura da superfície interna do isolamento (a  $180^\circ\text{C}$ ) e a da externa, e a partir dessa  $T_{med,1}$  se encontrar um  $k_1$  correspondente, pelo gráfico. Daí substitui-se esse  $k_1$  na Equação 7 e se encontra uma primeira estimativa da temperatura superficial do isolamento ( $T_{sup,2}$ ). Essa é a primeira interação.

Com essa  $T_{sup,2}$ , calcula-se uma nova temperatura média  $T_{med,2}$ . A partir dela e do gráfico se encontra um novo  $k$  (knovo), que será inserido na Equação 7 para finalmente se encontrar a nova  $T_{sup}$ . Essa é a segunda e última interação.

Para os cálculos da espessura seguinte, estima-se a  $T_{sup,1}$  de acordo com a  $T_{sup}$  encontrada para a espessura anterior.

Tudo isso é feito para cada material, e para cada espessura de isolamento, e os resultados estão expressos nas tabelas a seguir.

Valores constantes nas interações:

- $T_{int} = 180^\circ\text{C} = 453\text{K}$
- $R_{nú} = 0,0508 \text{ m}$
- $T_{amb} = 0^\circ\text{C} = 273\text{K}$
- $h_o = 15 \text{ W/m}^2\text{.K}$

**Silicato de cálcio – determinação de  $T_{sup}$  – 1º interação**

espessura isolamento		Risol		$T_{sup,1}$		$T_{med,1}$		$k_1$	$T_{sup,2}$	
pol.	m	pol.	m	°C	K	°C	K	W/m <sup>2</sup> .K	°C	K
1"	0,0254	3"	0,0762	150	423	165	438	0,064	22	295
1.1/2"	0,0381	3.1/2"	0,0889	21	294	100	373	0,060	13	286
2"	0,0508	4"	0,1016	13	286	97	370	0,059	10	283
2.1/2"	0,0635	4.1/2"	0,1143	10	283	95	368	0,059	7	280
3"	0,0762	5"	0,127	7	280	94	367	0,059	6	279
3.1/2"	0,0889	5.1/2"	0,1397	6	279	93	366	0,059	5	278
4"	0,1016	6"	0,1524	5	278	92	365	0,059	4	277

*Tabela 5.2.1.1: 1º interação para determinação da  $T_{sup}$  do silicato de cálcio*

**Silicato de cálcio – determinação de  $T_{sup}$  – 2º interação**

espessura isolamento		Risol		$T_{sup,2}$		$T_{med,2}$		$k$	$T_{sup}$	
pol.	m	pol.	m	°C	K	°C	K	W/m <sup>2</sup> .K	°C	K
1"	0,0254	3"	0,0762	22	295	101	374	0,060	21	294
1.1/2"	0,0381	3.1/2"	0,0889	13	286	97	370	0,059	13	286
2"	0,0508	4"	0,1016	10	283	95	368	0,059	10	283
2.1/2"	0,0635	4.1/2"	0,1143	7	280	94	367	0,059	7	280
3"	0,0762	5"	0,127	6	279	93	366	0,059	6	279
3.1/2"	0,0889	5.1/2"	0,1397	5	278	92	365	0,059	5	278
4"	0,1016	6"	0,1524	4	277	92	365	0,059	4	277

*Tabela 5.2.1.2: 2º interação para determinação da  $T_{sup}$  do silicato de cálcio*

Lã de rocha – determinação de $T_{sup}$ – 1º interação										
espessura isolamento		Risol		$T_{sup,1}$		$T_{med,1}$		$k_1$	$T_{sup,2}$	
pol.	m	pol.	m	°C	K	°C	K	W/m².K	°C	K
1"	0,0254	3"	0,0762	150	423	165	438	0,045	16	289
1.1/2"	0,0381	3.1/2"	0,0889	14	287	97	370	0,040	9	282
2"	0,0508	4"	0,1016	9	282	95	368	0,040	7	280
2.1/2"	0,0635	4.1/2"	0,1143	7	280	93	366	0,040	5	278
3"	0,0762	5"	0,127	5	278	93	366	0,040	4	277
3.1/2"	0,0889	5.1/2"	0,1397	4	277	92	365	0,040	3	276
4"	0,1016	6"	0,1524	3	276	92	365	0,040	3	276

Tabela 5.2.1.3: 1º interação para determinação da  $T_{sup}$  da lã de rocha

Lã de rocha – determinação de $T_{sup}$ – 2º interação										
espessura isolamento		Risol		$T_{sup,2}$		$T_{med,2}$		$k$	$T_{sup}$	
pol.	m	pol.	m	°C	K	°C	K	W/m².K	°C	K
1"	0,0254	3"	0,0762	16	289	98	371	0,040	14	287
1.1/2"	0,0381	3.1/2"	0,0889	9	282	95	368	0,040	9	282
2"	0,0508	4"	0,1016	7	280	93	366	0,040	7	280
2.1/2"	0,0635	4.1/2"	0,1143	5	278	93	366	0,040	5	278
3"	0,0762	5"	0,127	4	277	92	365	0,040	4	277
3.1/2"	0,0889	5.1/2"	0,1397	3	276	92	365	0,040	3	276
4"	0,1016	6"	0,1524	3	276	91	364	0,040	3	276

Tabela 5.2.1.4: 2º interação para determinação da  $T_{sup}$  da lã de rocha

**Fibra de vidro – determinação de  $T_{sup}$  – 1º interação**

espessura isolamento		Risol		$T_{sup,1}$		$T_{med,1}$		$k_1$	$T_{sup,2}$	
pol.	m	pol.	m	°C	K	°C	K	W/m <sup>2</sup> .K	°C	K
1"	0,0254	3"	0,0762	150	423	165	438	0,041	15	288
1.1/2"	0,0381	3.1/2"	0,0889	13	286	97	370	0,037	8	281
2"	0,0508	4"	0,1016	8	281	94	367	0,037	6	279
2.1/2"	0,0635	4.1/2"	0,1143	6	279	93	366	0,037	5	278
3"	0,0762	5"	0,127	5	278	92	365	0,037	4	277
3.1/2"	0,0889	5.1/2"	0,1397	4	277	92	365	0,037	3	276
4"	0,1016	6"	0,1524	3	276	92	365	0,037	3	276

*Tabela 5.2.1.5: 1º interação para determinação da  $T_{sup}$  da fibra de vidro*

**Fibra de vidro – determinação de  $T_{sup}$  – 2º interação**

espessura isolamento		Risol		$T_{sup,2}$		$T_{med,2}$		$k$	$T_{sup}$	
pol.	m	pol.	m	°C	K	°C	K	W/m <sup>2</sup> .K	°C	K
1"	0,0254	3"	0,0762	15	288	97	370	0,037	13	286
1.1/2"	0,0381	3.1/2"	0,0889	8	281	94	367	0,037	8	281
2"	0,0508	4"	0,1016	6	279	93	366	0,037	6	279
2.1/2"	0,0635	4.1/2"	0,1143	5	278	92	365	0,037	5	278
3"	0,0762	5"	0,127	4	277	92	365	0,037	4	277
3.1/2"	0,0889	5.1/2"	0,1397	3	276	92	365	0,037	3	276
4"	0,1016	6"	0,1524	3	276	91	364	0,037	3	276

*Tabela 5.2.1.6: 2º interação para determinação da  $T_{sup}$  da fibra de vidro*

Para cada material isolante, os valores de  $T_{sup}$  e  $k$  a serem considerados para futuros cálculos são os que se encontram nas partes sombreada das tabelas.

### 5.2.2 Perdas de Energia

Para se determinar as perdas de energia utiliza-se a Equação 6, sabendo-se que  $T_{int} = 180^{\circ}\text{C} = 453\text{ K}$  e usando também os  $k$ 's e  $T_{sup}$ 's determinados anteriormente. Os resultados estão expressos nas tabelas a seguir.

Silicato de cálcio – perda de calor na tubulação								
espessura isolamento		Risol		K	$T_{sup}$		perdas/m	perdas
pol.	m	pol.	m	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	$^{\circ}\text{C}$	K	$\text{W}/\text{m}$	W
1"	0,0254	3"	0,0762	0,060	21	294	147,2	14.720
1.1/2"	0,0381	3.1/2"	0,0889	0,059	13	286	110,9	11.090
2"	0,0508	4"	0,1016	0,059	10	283	91,4	9.140
2.1/2"	0,0635	4.1/2"	0,1143	0,059	7	280	79,0	7.900
3"	0,0762	5"	0,127	0,059	6	279	70,4	7.040
3.1/2"	0,0889	5.1/2"	0,1397	0,059	5	278	64,1	6.410
4"	0,1016	6"	0,1524	0,059	4	277	59,3	5.930

Tabela 5.2.2.1: Perdas de calor na tubulação com silicato de cálcio

Lã de rocha – perda de calor na tubulação								
espessura isolamento		Risol		K	T <sub>sup</sub>		perdas/m	perdas
pol.	m	pol.	m	W/m <sup>2</sup> .K	°C	K	W/m	W
1"	0,0254	3"	0,0762	0,040	14	287	103,6	10.360
1.1/2"	0,0381	3.1/2"	0,0889	0,040	9	282	77,0	7.700
2"	0,0508	4"	0,1016	0,040	7	280	63,0	6.300
2.1/2"	0,0635	4.1/2"	0,1143	0,040	5	278	54,3	5.430
3"	0,0762	5"	0,127	0,040	4	277	48,3	4.830
3.1/2"	0,0889	5.1/2"	0,1397	0,040	3	276	43,9	4.390
4"	0,1016	6"	0,1524	0,040	3	276	40,5	4.050

Tabela 5.2.2.2: Perdas de calor na tubulação com Lã de rocha

Fibra de vidro – perda de calor na tubulação								
espessura isolamento		Risol		K	T <sub>sup</sub>		perdas/m	perdas
pol.	m	pol.	m	W/m <sup>2</sup> .K	°C	K	W/m	W
1"	0,0254	3"	0,0762	0,037	13	286	95,6	9.560
1.1/2"	0,0381	3.1/2"	0,0889	0,037	8	281	70,9	7.090
2"	0,0508	4"	0,1016	0,037	6	279	58,0	5.800
2.1/2"	0,0635	4.1/2"	0,1143	0,037	5	278	49,9	4.990
3"	0,0762	5"	0,127	0,037	4	277	44,4	4.440
3.1/2"	0,0889	5.1/2"	0,1397	0,037	3	276	40,3	4.030
4"	0,1016	6"	0,1524	0,037	3	276	37,2	3.720

*Tabela 5.2.2.3: Perdas de calor na tubulação com fibra de vidro*

A partir das perdas de energia, pode-se calcular a temperatura no final tubulação para cada caso, utilizando o mesmo procedimento da seção 3.3. Os resultados estão na tabela abaixo:

Espessura	Temperatura no final da tubulação		
	140 °C		
Com isolam.	Silicato de cálcio	Lã de rocha	Fibra de vidro
1"	173,2 °C	175,2 °C	175,6 °C
1.1/2"	174,9 °C	176,4 °C	176,7 °C
2"	175,8 °C	177,1 °C	177,3 °C
2.1/2"	176,3 °C	177,5 °C	177,7 °C
3"	176,7 °C	177,8 °C	177,9 °C
3.1/2"	177,0 °C	178,0 °C	178,1 °C
4"	177,3 °C	178,1 °C	178,3 °C

*Tabela 5.2.2.4: Temperaturas na saída da tubulação*

Nesse ponto ressalva-se que quaisquer que sejam materiais e espessuras (dentro dos analisados) utilizados para o isolamento, a temperatura na entrada da turbina será satisfatória.

### **5.2.3 Custo da Energia Perdida**

Para o cálculo anual deste custo, deve se levar em consideração a alimentação da caldeira e seu rendimento, bem como o tempo de funcionamento da caldeira. Usa-se então a seguinte expressão para cálculo do custo anual de energia CE:

$$CE = (\text{consumo anual de energia}) \times (\text{preço do combustível}) \quad (\text{Eq. 8})$$

Com:

$$\text{Consumo anual de energia} = (t \times p) / (\eta \times PC) \quad (\text{m}^3/\text{ano})$$

$t \rightarrow$  tempo em segundos de operação da caldeira por ano

$p \rightarrow$  perda de energia em W (das Tabelas 7, 8 e 9)

$\eta \rightarrow$  rendimento da caldeira = 0,3 (= 30%)

$PC \rightarrow$  poder calorífico do combustível ( $\text{J/m}^3$ ); no caso o combustível utilizado é o gás natural, e para ele foi usado  $PC = 9.400 \text{ kcal/m}^3$  ou  $PC = 39.356 \text{ kJ/m}^3$

Preço do combustível ( $\text{R$/ m}^3$ )  $\rightarrow$  Esses custos foram retirados da tabela de Tarifas do Gás Canalizado na área de concessão da COMGÁS, da CSPE (Comissão de Serviços Públicos de Energia) (ver bibliografia). Nos casos analisados podem ocorrer duas situações: consumo entre  $131 \text{ m}^3$  e  $1.000 \text{ m}^3$ , o que acarreta num importe de R\$  $[57,69 + (0877263 \times \text{cunsumo anual de gás})]$ , ou então consumo entre  $1.001 \text{ m}^3$  e  $5.000 \text{ m}^3$ , gerando um importe de R\$  $[106,45 + (0,0,828354 \times \text{cunsumo anual de gás})]$

#### Cálculo de t:

$$t = 8 \text{ (h/dia)} \times 260 \text{ (dias/ano)} \times 3.600 \text{ s} = 7.488.000 \text{ segundos/ano}$$

Os valores encontrados estão nas tabelas a seguir:

<b>Silicato de cálcio – Custo com as perdas de energia</b>			
Espessura isolamento	Perdas de energia	Consumo anual de energia	CE: Gasto anual com perdas de energia (usando equações da CSPE)
polegadas	W	(m <sup>3</sup> /ano)	R\$
sem isol.	86.180	54.656,40	<b>38.936,00</b>
1"	14.723	9.337,33	<b>7.066,64</b>
1.1/2"	11.095	7.036,56	<b>5.337,27</b>
2"	9.136	5.793,87	<b>4.403,20</b>
2.1/2"	7.899	5.009,66	<b>3.813,75</b>
3"	7.043	4.466,82	<b>3.405,73</b>
3.1/2"	6.413	4.066,99	<b>3.105,19</b>
4"	5.927	3.759,06	<b>2.873,74</b>

*Tabela 5.2.3.1: Custo das perdas de energia para silicato de cálcio*

<b>Lã de rocha – Custo com as perdas de energia</b>			
Espessura isolamento	Perdas de energia	Consumo anual de energia	CE: Gasto anual com perdas de energia (usando equações da CSPE)
polegadas	W	(m <sup>3</sup> /ano)	R\$
sem isol.	86.180	54.656,40	<b>38.936,00</b>
1"	10.359	6.569,61	<b>4.986,29</b>
1.1/2"	7.703	4.885,48	<b>3.720,41</b>
2"	6.302	3.996,61	<b>3.052,29</b>
2.1/2"	5.428	3.442,43	<b>2.635,74</b>
3"	4.828	3.061,75	<b>2.349,60</b>
3.1/2"	4.388	2.782,83	<b>2.139,96</b>
4"	4.050	2.568,86	<b>1.979,12</b>

*Tabela 5.2.3.2: Custo das perdas de energia para lã de rocha*

<b>Fibra de vidro – Custo com as perdas de energia</b>			
Espessura isolamento	Perdas de energia	Consumo anual de energia	CE: Gasto anual com perdas de energia (ausando equações da CSPE)
polegadas	W	(m <sup>3</sup> /ano)	R\$
sem isol.	86.180	54.656,40	<b>38.936,00</b>
1"	9.563	6.065,13	<b>4.607,10</b>
1.1/2"	7.094	4.499,11	<b>3.430,00</b>
2"	5.796	3.676,00	<b>2.811,31</b>
2.1/2"	4.989	3.163,98	<b>2.426,45</b>
3"	4.435	2.812,76	<b>2.162,45</b>
3.1/2"	4.030	2.555,68	<b>1.969,22</b>
4"	3.719	2.358,61	<b>1.821,09</b>

*Tabela 5.2.3.3: Custo das perdas de energia para fibra de vidro*

Os custos apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12 apresentam valores que se repetem ao longo da vida útil do sistema de isolamento. Portanto, deve-se converter esses custos para seus valores atuais. Para isso faz-se uso da equação:

$$CEva = f(j,n) \times CE \quad (\text{Eq. 9})$$

Onde:

CEva → Custo atualizado das perdas de energia

$$j = [ (1 + i) / (1 + \Delta) ] - 1$$

$$f(j,n) = \text{fator de atualização} = [ (1+j)^n - 1 ] / [ j \times (1 + j)^n ]$$

Com

$n \rightarrow$  Vida do sistema de isolamento, em anos

$i \rightarrow$  Taxa de atratividade anual, geralmente adota-se 15%

$\Delta \rightarrow$  Taxa de crescimento diferenciado do custo de energia, ou seja, taxa de crescimento anual do preço do combustível em relação a moeda considerada.

Efetuando-se os cálculos (considerando  $\Delta = 5\%$  e  $n = 5$  anos de vida útil do isolante – dado do fornecedor), obtém-se:

- $j = 0,0952$ ;
- $f(j,n) = 3,839$ .

Multiplicando-se então esse fator pelos custos CE obtidos nas tabelas 10, 11 e 12 para atualizar o valor dos custos com perdas de energia, obtém-se os custos finais das perdas de energia por tipo de isolante e por espessura, na Tabela 13 abaixo.

CUSTO FINAL ANUAL DAS PERDAS DE ENERGIA			
Espessura	Silicato de cálcio	Lã de rocha	Fibra de vidro
sem isolam.	R\$ 149.514,24	R\$ 149.514,24	R\$ 149.514,24
1"	R\$ 27.135,92	R\$ 19.147,35	R\$ 17.691,25
1.1/2"	R\$ 20.495,13	R\$ 14.286,38	R\$ 13.171,19
2"	R\$ 16.908,29	R\$ 11.720,79	R\$ 10.795,42
2.1/2"	R\$ 14.644,82	R\$ 10.121,25	R\$ 9.317,56
3"	R\$ 13.078,00	R\$ 9.022,48	R\$ 8.303,82
3.1/2"	R\$ 11.923,93	R\$ 8.217,43	R\$ 7.561,80
4"	R\$ 11.035,14	R\$ 7.599,83	R\$ 6.992,97

Tabela 5.2.3.4: Custo anual atualizado das perdas de energia por tipo de isolante

### 5.3 Custo do Sistema de Isolamento

Para calcular o custo do sistema isolante (CI) propriamente pode-se usar a relação:

$$CI = I + R + M$$

Onde:

I → Custo do material isolante propriamente dito

R → Custo do material de revestimento

M → Custo da mão de obra para instalação do sistema isolante

Utilizando-se então dos preços informados pelo fornecedor (Tabelas 5.3.1 e 5.3.2, lembrando que os isolantes já estão associados a revestimentos), e multiplicando esses preços pelas devidas áreas e comprimentos, chega-se aos valores de CI, na Tabela 5.3.3.

<b>CUSTO DOS MATERIAIS ISOLANTES</b>			
<b>Espessura</b>	<b>Silicato de cálculo</b>	<b>Lã de rocha</b>	<b>Fibra de vidro</b>
Polegadas	R\$/m	R\$/m	R\$/m
1"	19,25	14,26	14,84
1.1/2"	30,60	19,08	19,99
2"	43,53	24,60	25,71
2.1/2"	56,72	31,32	32,78
3"	71,12	36,74	38,28
3.1/2"	98,71	46,21	48,26
4"	128,18	48,91	50,98

*Tabela 5.3.1: Custo dos materiais isolantes*

<b>CUSTO DOS MATERIAIS DE REVESTIMENTO</b>	
Material	Custo (R\$/m <sup>2</sup> )
Chapa de alumínio corrugado (0,15mm espessura)	6,50
Chapa de alumínio liso (0,8mm espessura)	22,00
Chapa de aço carbono galvanizado	15,00

*Tabela 5.3.2: Custo dos materiais de revestimento*

<b>CUSTO DOS SISTEMAS ISOLANTES EM AVALIAÇÃO</b>				
<b>espessura</b>	<b>Área superficial da tubulação</b>	<b>Silicato de cálcio</b>	<b>Lã de rocha</b>	<b>Fibra de vidro</b>
Poleg.	m <sup>2</sup>	R\$	R\$	R\$
1"	47,88	3.097,97	3.341,06	3.399,06
1.1/2"	55,86	4.428,47	4.142,23	4.233,23
2"	63,84	5.916,96	5.013,41	5.124,41
2.1/2"	71,81	7.431,46	6.004,59	6.150,59
3"	79,79	9.066,96	6.865,76	7.019,76
3.1/2"	87,77	12.021,45	8.131,94	8.336,94
4"	95,75	15.163,95	8.721,12	8.928,12

*Tabela 5.3.3: Custo dos sistemas isolantes em avaliação*

Da mesma maneira que foi feito para os custos das perdas de energia, também é necessário trazer para o valor atual o custo ao longo do tempo do isolamento. Isso é feito pela fórmula:

$$Clva = Cl \times [1 + tm \times f(i,n)] \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde:

tm → percentual de custo de manutenção do sistema isolante, utiliza-se geralmente 2%

$$f(i,n) = \text{fator de atualização} = [ (1+i)^n - 1 ] / [ i \times (1 + i)^n ]$$

Com  $n = 5$  anos e  $i = 0,15$ ,  $f(i,n) = 3,352$ . Conseqüentemente a Equação 10 do custo atualizado do sistema de isolamento fica  $C_{Iva} = C_I \times 1,07$ . Aplicando essa fórmula para os valores previamente calculados da Tabela 16, obtém-se finalmente o custo anual atualizado do sistema de isolamento, na Tabela 17.

CUSTO FINAL DOS SISTEMAS DE ISOLAMENTO			
Espessura	Silicato de cálcio	Lã de rocha	Fibra de vidro
1"	R\$ 3.283,85	R\$ 3.541,52	R\$ 3.603,00
1.1/2"	R\$ 4.694,18	R\$ 4.390,77	R\$ 4.487,23
2"	R\$ 6.271,98	R\$ 5.314,22	R\$ 5.431,88
2.1/2"	R\$ 7.877,35	R\$ 6.364,86	R\$ 6.519,62
3"	R\$ 9.610,97	R\$ 7.277,71	R\$ 7.440,95
3.1/2"	R\$ 12.742,74	R\$ 8.619,86	R\$ 8.837,16
4"	R\$ 16.073,78	R\$ 9.244,38	R\$ 9.463,80

Tabela 5.3.4: Custo anual atualizado dos sistemas de isolamento

#### 5.4 Determinação das Espessuras Econômicas

Para se encontrar a espessura econômica que se deve ser usada na instalação para cada sistema de isolamento deve-se, para cada material se analisar o gráfico contendo três curvas: custo das perdas, custo do isolamento

e a soma desses dois custos, todos eles pela espessura. Esses dados estão na Tabela 5.4 e nos Gráficos 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3.

SOMA DOS CUSTOS DE PERDAS E ISOLAMENTO									
Espess.	Silicato de cálcio			Fibra de vidro			Lã de rocha		
	Custo perdas	Custo isolam	Soma	Custo perdas	Custo isolam	Soma	Custo perdas	Custo isolam	Soma
Poleg.	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$	R\$
Sem isolam.	149.514	0	149.514	149.514	0	149.514	149.514	0	149.514
1"	27.136	3.284	30.420	17.691	3.603	21.294	19.147	3.542	22.689
1.1/2"	20.495	4.694	25.189	13.171	4.487	17.658	14.286	4.391	18.677
2"	16.908	6.272	23.180	10.795	5.432	16.227	11.721	5.314	17.035
2.1/2"	14.645	7.877	22.522	9.318	6.520	15.837	10.121	6.365	16.486
3"	13.078	9.611	22.689	8.304	7.441	15.745	9.022	7.278	16.300
3.1/2"	11.924	12.743	24.667	7.562	8.837	16.399	8.217	8.620	16.837
4"	11.035	16.074	27.109	6.993	9.464	16.457	7.600	9.244	16.844

Tabela 5.4: Soma de custos de perdas e isolamento

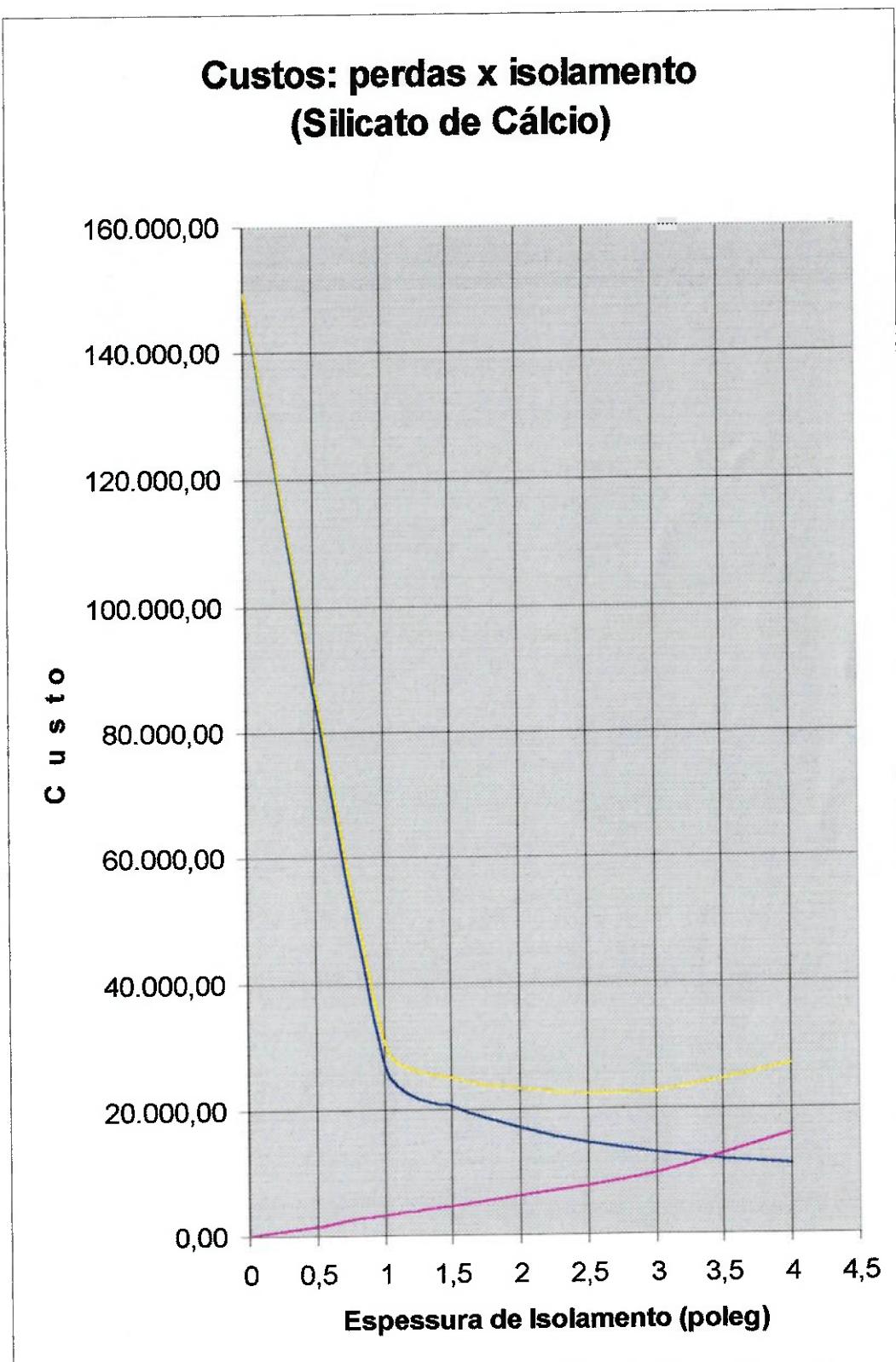


Gráfico 5.4.1: Soma de custos de perdas e isolamento – silicato de cálcio

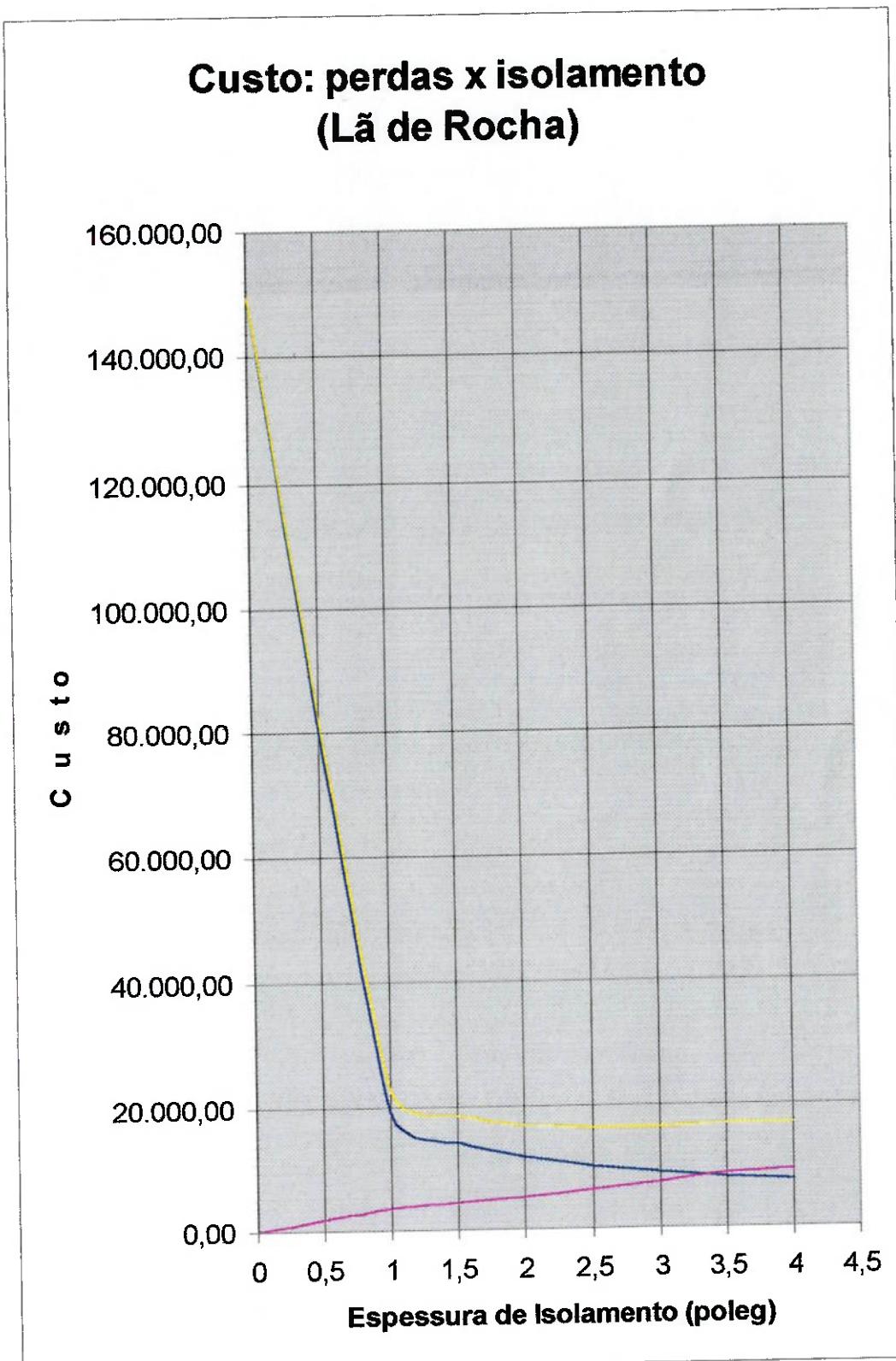
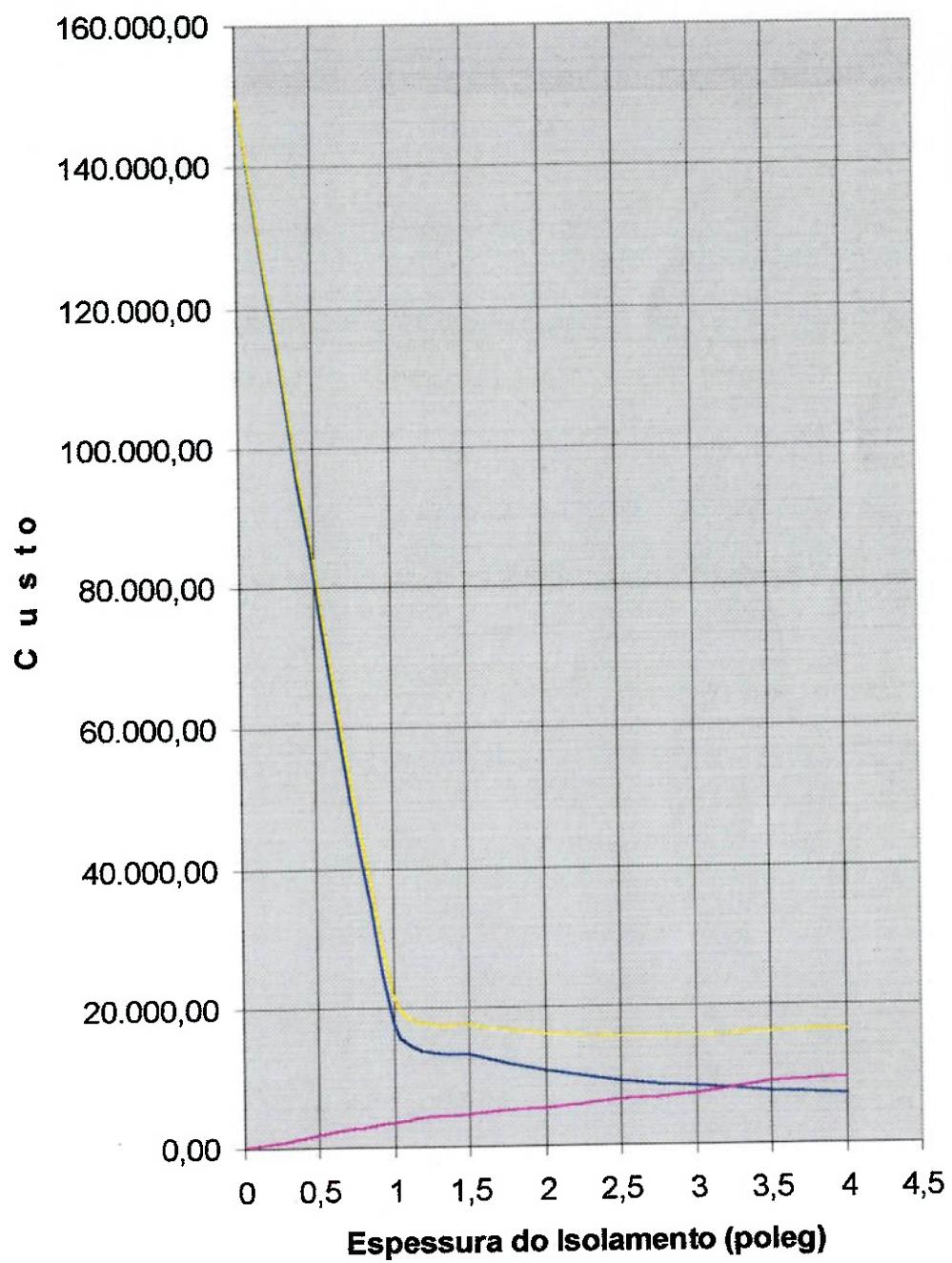


Gráfico 5.4.2: Soma de custos de perdas e isolamento – lã de rocha

### **Custos: perdas x isolamento (Fibra de Vidro)**



**Gráfico 5.4.3: Soma de custos de perdas e isolamento – fibra de vidro**

A legenda para os Gráficos 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3 é a seguinte:

- Custo das perdas de energia
- Custo do sistema de isolamento
- Soma dos custos

Analizando-se cada um dos três gráficos anteriores, percebe-se que a curva em amarelo, que representa a soma dos custos das perdas com os custos do sistema de isolamento, possui um ponto de mínimo, que representa então a chamada espessura econômica de isolamento.

Olhando com atenção os pontos de mínimo, e com auxílio da Tabela 18, obtém-se as seguintes espessuras econômicas para cada material:

- Espessura do isolamento com silicato de cálcio → **2.1/2"**
- Espessura do isolamento com lã de rocha → **3"**
- Espessura do isolamento com fibra de vidro → **3"**

## 5.5 Determinação do Material

Tendo-se definido qual a espessura adequada para a instalação do isolamento para cada material, analisa-se qual o custo de cada uma, (custo esse que já foi definido, na Tabela 5.3.4) e se escolhe o material correspondente ao menor custo. Essa análise está reproduzida na Tabela 5.5 abaixo.

Material isolante	Espessura escolhida	Custo anual do isolamento
Silicato de cálcio	2.1/2"	R\$ 7.877,35
Lã de rocha	3"	R\$ 7.277,71
Fibra de vidro	3"	R\$ 7.440,95

*Tabela 5.5: Custo de cada isolamento de acordo com espessura escolhida*

Finalmente, pela Tabela 5.5, decide-se que o material escolhido para o isolamento térmico da tubulação é a **LÃ DE ROCHA**, com revestimento de **CHAPA GALVANIZADA**.

## 6. INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE ISOLAMENTO

### 6.1 Preparação da Tubulação

Antes de se instalar o isolante deve-se tomar alguns cuidados.

Primeiramente é importante que quaisquer testes a serem realizados na tubulação sejam feitos antes da aplicação do isolamento. Caso contrário, deve-se deixar as regiões a inspecionar provisoriamente sem isolamento.

Para a instalação do isolamento a superfície da tubulação deve estar isenta de óxidos soltos, resíduos oleosos, graxa, umidade e quaisquer materiais estranhos. Portanto deverá ser bem limpa e seca antes da aplicação.

### 6.2 Materiais

Para isolação, será a lã de rocha selecionada de acordo com catálogo é a Lã de Rocha Basáltica Thermax, em formato de tubos em peça única com um corte longitudinal e um semi corte interno do lado oposto (denominado one-piece-pipe), conforme figura a seguir.



*Figura 6.2: Isotubo de lã de rocha one-piece-pipe da Thermax*

Sua espessura, de acordo com o catálogo e com a espessura econômica calculada é de 75 mm, diâmetro interno 4", em peças de 1000 mm de comprimento.

Para fixação do isolante serão usados arame galvanizado BWG 16 (1,60mm).

O revestimento é feito com chapas de aço carbono galvanizado de espessura 0,3mm, e sua fixação se dá por meio de parafusos auto atarrachantes 5/8" x 8.

Essas especificações foram feitas de acordo com a Norma N-250 revisão E, da Petrobrás.

## 6.3 Instalação

### 6.3.1 Fixação dos Tubos Isolantes

O primeiro passo é a colocação dos tubos isolantes na tubulação de vapor, obviamente fora de funcionamento. Cada isotubo, depois de encaixado na tubulação, com a descontinuidade para cima, deve ser fixado com uso de quatro tiras de arame, localizadas 50 mm de cada extremidade do isotubo e espaçadas com cerca de 300 mm.

Essa fixação deve ser feita enlaçando o arame (já nas distâncias especificadas) em volta do tubo, juntando as pontas do arame com uma torquesa, puxando-as e torcendo-as firmemente.

Após isso, deve-se cortar as pontas dos arames e apertar a cabeça contra o isotubo, evitando qualquer protuberância.

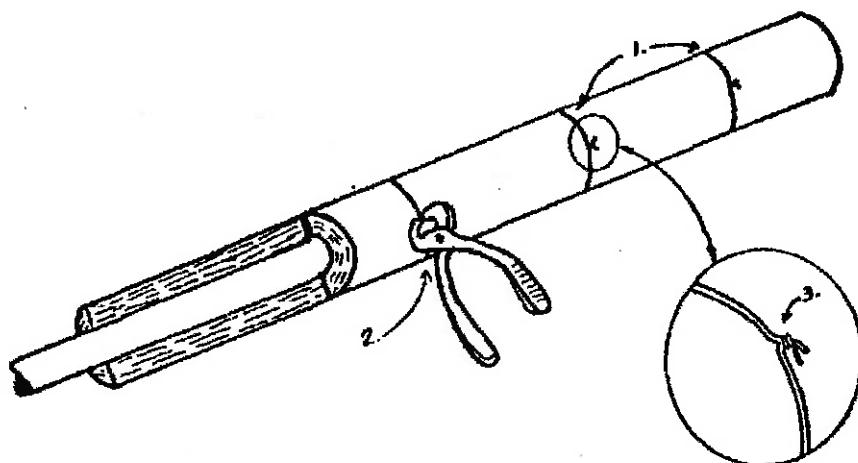


Figura 6.3.1: Instalação dos isotubos

### 6.3.2 Fixação do Revestimento

As chapas galvanizadas, já cortadas de tamanho apropriado ao diâmetro dos isotubo, devem ser adequadamente calandradas e frisadas nas bordas longitudinais e circunferenciais.

Cada chapa deve ser posicionada sempre sobre as descontinuidades entre isotubo, prejudicando eventual escape de calor.

Para instalação, enlaça-se a tubulação de isolamento com cada chapa, sendo que deverá haver sobreposição de 50 mm na junta longitudinal. Além disso essa sobreposição deverá se localizar numa posição inclinada, de acordo com a figura abaixo, evitando penetração de água.

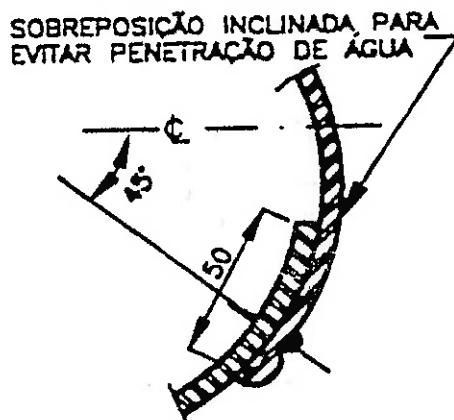
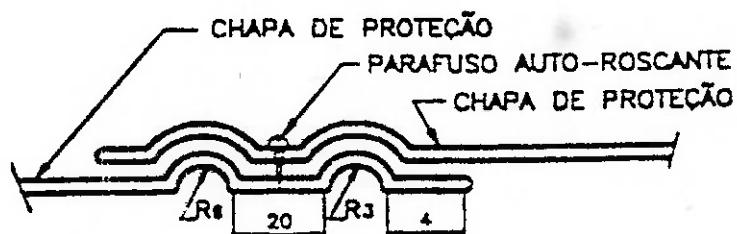


Figura 6.3.2.1: Sobreposição longitudinal

Nessa junta longitudinal, faz-se furos para fixação com os parafusos, espaçados longitudinalmente de 150 mm.

Além da sobreposição longitudinal para cada chapa, deverá também existir sobreposição circumferencial de 50 mm entre as chapas. Para cada junta circumferencial, devem ser aplicados quatro parafusos ao longo da circunferência, defasados de 90°. Ver Figura 6.



DETALHE DA JUNTA CIRCUNFERENCIAL

Figura 6.3.2.2: Sobreposição circumferencial

Para visualização geral de um trecho do sistema de isolamento já instalado na tubulação, ver Figura 6.3.2.3.

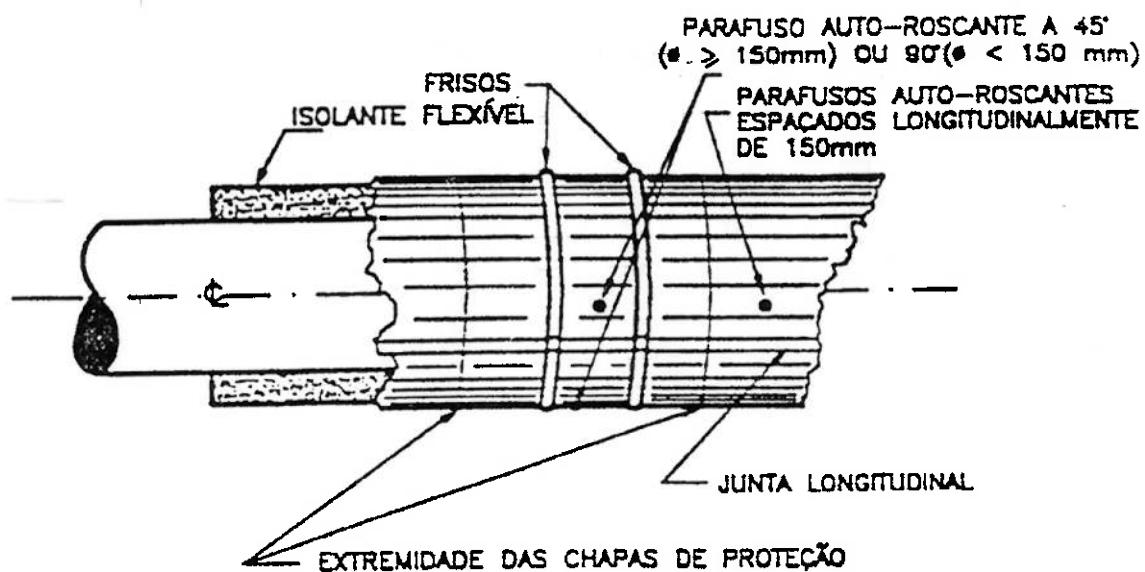


Figura 6.3.2.3: Isolamento com revestimento

## 7. CONCLUSÃO

Após o término desse projeto, conclui-se que é imprescindível o uso de isolamento térmico para casos semelhantes ao estudado. Aqui percebe-se uma economia anual de aproximadamente R\$ 135.000,00 (Tabela 5.4, comparando o custo das perdas de calor sem isolamento: R\$ 150.000,00, e custo com perdas de calor + isolamento, no caso de uso de isolamento: R\$ 16.000,00).

Já é sabido por todas as indústrias da necessidade de um sistema de isolamento térmico bem como a economia que ele proporciona.

Entretanto, nem sempre (de acordo com informações dadas pelas próprias instaladoras de isolamento térmico consultadas) é efetuada a análise de custos (que foi neste projeto desenvolvida) para determinação da “espessura econômica”, podendo ocorrer um superdimensionamento dessa espessura, o que não necessariamente irá gerar mais economia.

Para facilitar essa visualização, ver gráficos 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3, onde a curva de custos total (amarela) em função da espessura utilizada não é sempre decrescente, apresentando um ponto de mínimo.

Ver também na tabela a seguir, construída com os dados calculados do isolamento com lã de rocha, como a eficiência do isolamento diminui em função do acréscimo da espessura.

ISOLAMENTO COM LÃ DE ROCHA			
Espessura	Perdas de calor	Eficiência do Isolamento	Acréscimo de Eficiência
sem isol.	86.180 W	-	-
1"	10.359 W	88,0 %	88,0 %
1.1/2"	7.703 W	91,1 %	3,1 %
2"	6.302 W	92,7 %	1,6 %
2.1/2"	5.428 W	93,7 %	1,0 %
3"	4.828 W	94,4 %	0,7 %
3.1/2"	4.388 W	94,9 %	0,5 %
4"	4.050 W	95,3 %	0,4 %

*Tabela 7: Diminuição da eficiência do isolamento com aumento da espessura*

Conclui-se então que é necessário para o projeto de isolamentos térmicos (bem como para outros projetos de engenharia e inclusive para situações cotidianas da vida, defrontadas a todo tempo) uma pesquisa detalhada de custos, para se ter certeza de se estar realizando um bom negócio.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- INCROPERA, F. P. e Witt, D. P. – ***Fundamentos de Transferência de Calor e Massa***, 3º edição.
- WYLEN, G. V., SONNTAG, R. e BORGNAKKE, C. – ***Fundamentos da Termodinâmica Clássica***, 4º edição.
- ***Normas Petrobrás N-250*** revisão E (Abril/1.995), ***N-550*** revisão D (Novembro/1.995) e ***N-1618*** revisão C (Janeiro/1.996).
- SANTOS, E. – ***Manual de Montagem Isolamento Térmico***, Rockwoolbras.
- Catálogo: ***Isolantes em Lã de Rocha Basáltica THERMAX***, fabricante Rockfibras.
- Catálogo: ***Tuboglass – Sistema de Isolação Térmica para Tubulações Industriais***, fabricante ISOVER – Santa Marina.
- Catálogo: ***Silicato de Cálcio – ROCK-SIL***, fabricante Rockfibras.
- LEE, S. C. e CUNNINGTON, G. R. – ***Heat Transfer in Fibrous Insulation: Comparison of Theory and Experiment***, Journal of Thermophysics and Heat Transfer. Volume 12, Number 3.
- MALLOY, T. – ***Thermal Insulation Handbook***, McGrawHill, 1981.

- KUAE, L. K. N., BONESIO, M. C. M. e VILLELA, M. C. – ***Diretrizes para Apresentações de Dissertações e Teses***, Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1991.
- TELLES, P. C. S. – ***Tubulações Industriais***, EPUSP. Rio de Janeiro, 1968.
- Site [www.cspe.sp.gov.br](http://www.cspe.sp.gov.br) – Tarifas de consumo de gás.