

Maria Celina Britto Bacellar

**Projeto de Aparato Experimental
para Avaliação de Métodos de Intensificação de
Transferência de Calor**

Trabalho de Formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo, nos cursos: Projeto
Mecânico I, II (PMC 580 e PMC 581).

São Paulo
1.994

Maria Celina Britto Bacellar

**Projeto de Aparato Experimental
para Avaliação de Métodos de Intensificação de
Transferência de Calor**

Trabalho de Formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo, nos cursos: Projeto
Mecânico I, II (PMC 580 e PMC 581).

Área:
Transferência de calor

Orientador:
Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara

São Paulo
1.994

Sumário

Resumo

1.	Introdução	
	Objetivos e desenvolvimento	1
2.	Trocadores de calor compactos e técnicas de intensificação de troca de calor	
	Trocadores de calor compactos	3
	- Introdução.....	3
	- Uso de trocadores de calor compactos em indústrias	4
	- Aplicação em sistemas de ar condicionado e refrigeração.....	5
	Técnicas de intensificação de troca de calor	8
	- Técnicas principais	8
	- Principais áreas de aplicação	11
	- Análise e conclusão	12
3.	Técnicas experimentais	
	Técnicas experimentais	13
	Termopares	14
	O uso de cristal líquido na troca de calor	18
	- Introdução	18
	- Vantagens no uso de cristal líquido	18
	- Classificação	19
	- Propriedades da mudança de cor	27
	- Aplicação do cristal líquido	28
	Analogia entre transferências de calor e massa - Sublimação do naftaleno	30
	Transferência de calor convectiva - Analogia com transferência de massa para fluidos com propriedades constantes	37
4.	Viabilidade das técnicas de medição	
	Viabilidade das técnicas de medição	43
	Técnica de placa aquecida com uso de termopares	44
	Técnica de placa aquecida com uso de cristal líquido	47

Técnica de sublimação de naftaleno	49
5. Estudo aplicado à técnica de sublimação de naftaleno	
Sublimação e naftaleno	50
Análise dimensional e teoria de semelhança	52
Tempo de tomada de dados	58
Estudo de transferência de calor adjacente à extremidade do cilindro em escoamento cruzado	60
- Introdução	60
- Experimento	61
- Aparato experimental	62
- Resultados do escoamento do fluido	70
- Resultados de transferência de massa	75
- Conclusão	80
- Aplicação ao aparato medidor de intensificação	81
Modelagem do naftaleno	83
Montagem do aparato	91
Medições a serem realizadas no experimento	93
Procedimento experimental	94
- Colocação dos geradores de vórtices	96
Mesa de coordenadas tridimensional	97
- Introdução	97
- Princípio de funcionamento	97
6. Conclusão	
Viabilidade do projeto	100
7. Referências bibliográficas	102

Apêndice

Resumo

Com o rápido desenvolvimento da tecnologia na área de transferência de calor, surgiu a necessidade de redução de volume e peso dos trocadores. Com isto, foi preciso que se desenvolvessem equipamentos capazes de detectar os avanços obtidos pela ciência neste campo.

Este trabalho foi desenvolvido dentro desta necessidade, visando o projeto de um aparato que obtenha resultados confiáveis, e que venham a contribuir no estudo de trocadores de calor cada vez mais compactos e eficientes.

O desenvolvimento da técnica de sublimação do naftaleno para a analogia com transferência de calor confere resultados bastante satisfatórios, visto que a análise destes será realizada por uma mesa de coordenadas tridimensional com elevada precisão.

O projeto foi desenvolvido com um completo embasamento teórico. Desta forma, é possível assegurar o seu correto funcionamento e aplicação.

1. Introdução

Objetivos e desenvolvimento

A idéia principal deste projeto é desenvolver um aparato experimental que realize medições no campo de intensificação de transferência de calor, e que possa vir a ser construído, de modo a incorporar-se ao túnel de vento já projetado e existente, disponível para este fim.

As técnicas de intensificação de troca de calor podem ser aplicadas a uma grande variedade de equipamentos térmicos, com o intuito básico de reduzir suas dimensões, além de aumentar a troca de calor efetuada pelos mesmos (aumentar o coeficiente global de transferência de calor).

Atualmente, estas técnicas vêm sendo aplicadas para a produção de trocadores de calor compactos, em indústrias que trabalham com fenômenos de aquecimento, ventilação, refrigeração e condicionadores de ar. Outras indústrias também têm feito uso da intensificação de troca de calor: automobilísticas, químicas, revestimento industrial, aeronaves e até no resfriamento de componentes eletrônicos.

Devido a este rápido desenvolvimento de novas técnicas, é necessário que se avalie o desempenho de cada uma delas. Este projeto pretende funcionar como auxiliar no desenvolvimento das mesmas.

A primeira etapa deste projeto constitui-se do levantamento de dados genéricos, tais como as técnicas mais utilizadas de intensificação e os métodos mais práticos e viáveis de medição destes efeitos. Inclui, também, um estudo das analogias passíveis de serem empregadas no projeto, tal como a analogia de transferência de massa.

A segunda etapa baseia-se nos estudos feitos na primeira fase, visando a escolha da melhor alternativa de projeto, bem como o desenvolvimento do aparato, salientando suas principais características e modo de funcionamento.

2.Trocadores de calor compactos e técnicas de intensificação de troca de calor

Trocadores de calor compactos

As pesquisas e o desenvolvimento de trocadores de calor compactos e com maior eficiência vem se intensificando, desde a crise do petróleo, quando foram incentivados os estudos de novos e alternativos recursos de energia além de métodos de conservação da mesma.

Trocadores de calor compactos em indústrias de automóveis e ar condicionado têm sua própria história com notáveis avanços. Atualmente, os dados destes progressos estão especialmente voltados para aletas paralelas com pequenas tiras para intensificação de troca de calor por convecção forçada em escoamento de ar, devido a interrupções das camadas de contorno (camada limite).

Introdução

Diversos países, ultimamente, vem enfrentando um sério problema em assegurar a existência de fornecimento de energia para suas indústrias de máquinas, que se tornaram, com o passar do tempo, dependentes do óleo importado.

Fazer trocadores de calor quanto mais compactos possível tem sido uma constante exigência nas indústrias de automóveis e ar condicionado, onde a redução de espaço ocupado por estes equipamentos é uma necessidade básica. Os produtores estão ansiosos em adotar novas idéias em seus trocadores de calor, com as quais possam anunciar novos produtos como solução para os problemas de espaço e redução de custos de operação.

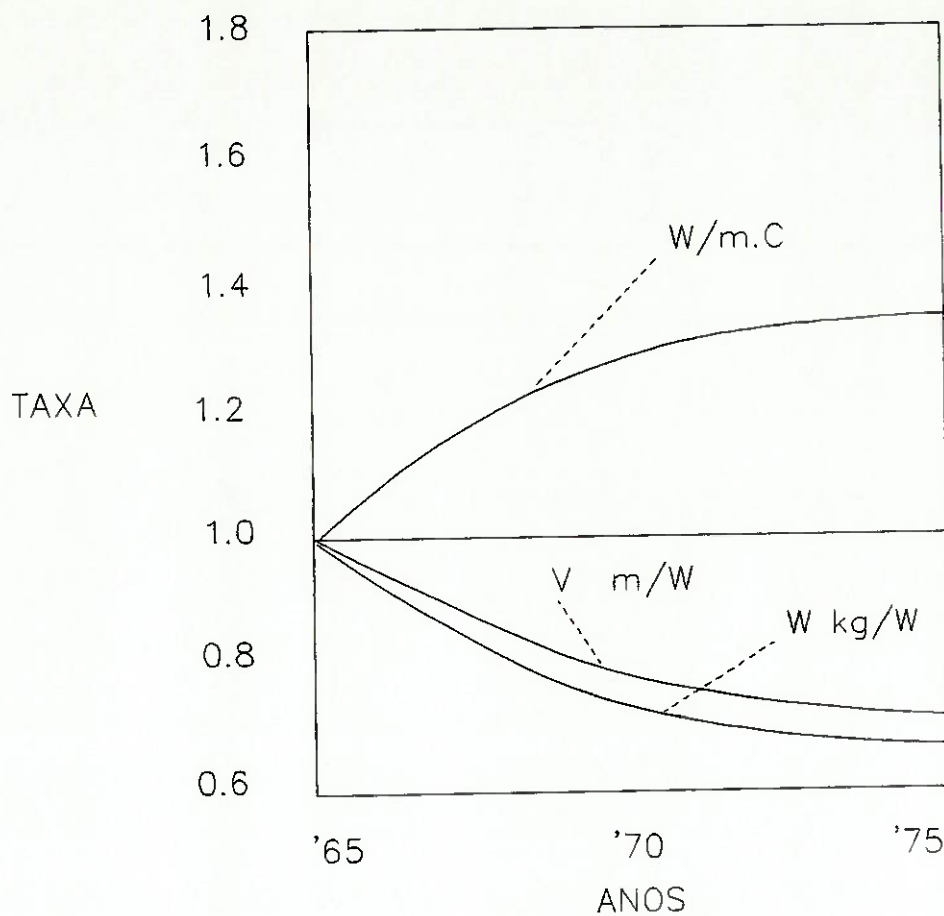
A busca por conservação de energia nas plantas industriais tem promovido uma maior análise dos sistemas de fluxo de calor, conduzindo a uma substituição dos trocadores já

existentes por novos, mais desenvolvidos ou pela instalação de trocadores de calor regenerativos. A exequibilidade de ciclos de Rankine operando com fluidos orgânicos vem sendo estudada e testada em plantas de aço para obter energia de gases de exaustão; também está sendo estudada em universidades para utilização com sistemas de energia solar, geotérmica, gradiente de temperatura dos oceanos e regeneração das perdas de calor em fábricas. Para todas estas aplicações energéticas, os trocadores de calor de alta performance são substancialmente importantes.

Quando se fala da importância dos trocadores de calor compactos, não se pode deixar de ressaltar a importância destes nas indústrias de criogênio. Trocadores de calor nestas aplicações criogênicas vêm sendo submetidos a uma transição, com a substituição dos trocadores tubulares pelos compactos.

Uso de trocadores de calor compactos em indústrias

Para uma visão mais ampla dos avanços obtidos pela tecnologia de trocadores de calor compactos, pode-se verificar pelo gráfico de Avanços na troca de calor a seguir, as alterações impostas por estes. As linhas cheias mostram um exemplo da redução de peso (W) e volume (V) por calor rejeitado nos radiadores de automóveis. Em dez anos, o peso e o volume foram reduzidos em, aproximadamente, 35% com relação àqueles produzidos em 1965. Tomando-se uma outra referência, verifica-se que os radiadores tornaram-se 70% mais leves e mais compactos em relação àqueles produzidos há pouco mais de 20 anos atrás.



Avanços na troca de calor

Aplicação em sistemas de ar condicionado e refrigeração

O número de condicionadores de ar que vêm sendo vendidos para residências e escritórios aumenta anualmente. Por exemplo, uma estatística um pouco antiga mostra que o número de unidades da classe de capacidade menor que 0,75 kW produzidos no período de outubro de 1976 a setembro de 1977 foi da ordem de 1,48 milhões, de 1977 para 1978 foi de 1,92 milhões e de 1978 a 1979, de 2,96 milhões. A maioria dos trocadores de calor são feitos com aletas de alumínio e tubos de cobre. Estes tubos são fixados às aletas por um processo de expansão mecânica, pela introdução de um molde (matriz) ou líquido a alta pressão.

Dentre um grande número de detalhes envolvidos nesta evolução, deve-se ressaltar a importância de três pontos principais no avanço da tecnologia de compactação dos trocadores de calor. O primeiro é a redução da espessura das aletas. Em 1973, foi reduzida de 0,20 mm para 0,18 mm; em 1975, para 0,15 mm e, em 1980 para 0,13 mm. Este é o resultado dos esforços dos produtores para reduzir os custos dos trocadores de calor, que requerem altas tonelagens de alumínio. O segundo importante ponto é a adoção de superfícies estruturais menores para as aletas. Desde alguns anos atrás, uma técnica comum de aumento da superfície que vem sendo utilizada, é a corrugação das aletas na direção do fluxo de ar.

A tentativa mais direta de se quebrar o desenvolvimento da camada limite, intermitentemente, é levantando estreitas tiras desde a base da placa. Estas finas tiras são colocadas paralelamente ao escoamento de ar, uma atrás da outra, com um espaçamento entre elas.

De todas estas informações, verifica-se que a adoção de aletas dotadas de tiras de intensificação de troca de calor contribui muito no desempenho dos trocadores de calor, apenas aumentando em pequena escala os gastos com força de ventilação.

O número de Reynolds para este tipo de intensificador de troca de calor fica na faixa de 100 a 1000.

A produção deste tipo de aletas dotadas de tiras, requer cuidado. A produção em massa delas, exige "know-how" na conformação das mesmas. Deformação ou rugosidade nas franjas das tiras pode ocasionar zonas de alta pressão compensando assim, o ganho obtido com o aumento do coeficiente de troca de calor.

O terceiro ponto a ser ressaltado é o aumento de transferência de calor do lado do tubo. Em termos de resistência térmica, a resistência da superfície interna do tubo, onde o refrigerante evapora-se ou condensa-se, ocupa 20% do total de resistência térmica. Desde que um grande aumento no lado do ar não possa ser previsto, em vista de se reduzir os níveis de ruído, reduzir a resistência do tubo é um esforço que vale a pena.

Entretanto, aletas internas podem produzir coeficientes de troca de calor altos o suficiente para compensar o custo de material adicionado para a fabricação das mesmas. Uma idéia que vem sendo desenvolvida é a produção de tubos com pequenas ranhuras internamente.

Técnicas de intensificação de troca de calor

As técnicas de intensificação de troca de calor podem ser classificadas em métodos passivos que não requerem aplicação direta de forças externas, ou como esquemas ativos que necessitam de forças externas. A efetividade destas duas técnicas depende fortemente do modo de troca de calor.

Técnicas principais

Uma breve descrição das técnicas passivas será feita abaixo:

Tratamento de superfícies:

É feita uma pequena alteração no acabamento ou revestimento da superfície (contínua ou descontínua). São utilizadas para condensadores e evaporadores; esta rugosidade inserida é inferior àquela que afeta a transferência de calor monofásica.

Superfícies ásperas:

São produzidas em várias configurações variando desde rugosidade de grãos de areia até discretas protuberâncias. As configurações são normalmente escolhidas para promover turbulência, mais do que para aumentar a área da superfície de troca de calor.

Superfícies estendidas:

São rotineiramente empregadas em diversos trocadores de calor. O desenvolvimento de novos tipos de superfícies estendidas, tal como aletas de câmaras de ar, e a melhoria dos coeficientes de troca de calor nestas superfícies são de particular interesse.

Dispositivos de intensificação:

São colocados no duto de escoamento com o intuito de aumentar indiretamente o transporte de energia para a região aquecida. Estes dispositivos são utilizados em escoamento forçado.

Dispositivos de turbilhonamento:

Estes dispositivos têm como função a geração de turbulência no escoamento. Abrangem um bom número de arranjos geométricos ou colocação de tubos para escoamento forçado que produzem rotação e/ou escoamento secundário. Alguns deles: tubos espiralados, geradores de vórtices, insertos de fita torcida, insertos núcleo-axiais com curvas tipo rosqueadas.

Aditivos para líquidos:

É a inclusão de partículas sólidas e bolhas de gás em escoamentos monofásicos e sistemas de evaporação.

Aditivos para gases:

São gotículas de líquido ou partículas sólidas, tanto em fase diluída (suspensão gás-sólido), como fase concentrada (leitos fluidizados).

Algumas técnicas ativas são:

Acessórios mecânicos:

Agitam o fluido por meios mecânicos ou pela rotação da superfície. "Retalhos" de superfícies, amplamente usados para líquidos viscosos em processos químicos industriais, podem também ser aplicados para escoamentos de gases por condutos. Equipamentos com dutos trocadores de calor rotativos são encontrados nas práticas comerciais.

Vibração da superfície:

São utilizadas tanto em altas como em baixas frequências para melhorar a troca de calor em escoamentos monofásicos.

Vibração do fluido:

É o tipo mais prático de intensificação por vibração. A faixa de vibração varia de 1 Hz a ultrasom. Utiliza-se em escoamentos monofásicos.

Campos eletrostáticos:

São utilizados de diferentes modos para fluidos dielétricos. Genericamente falando, campos eletrostáticos podem ser utilizados para fazer com que o fluido se concentre mais próximo à superfície de troca de calor. Campos elétricos e magnéticos podem ser combinados para que, juntos, proporcionem força de convecção via bombeamento eletromagnético.

Injeção de fluido:

O processo de injeção envolve o fornecimento de gás a um líquido que flui através de uma superfície porosa de troca de calor ou a injeção de um fluido similar em sentido contrário na seção de troca de calor. A extração do gás de líquidos dessa superfície gera aumento similar à injeção de gás. Somente escoamento monofásico é de interesse.

Sucção de fluido:

É constituída por remoção de vapor através de uma superfície porosa aquecida, em escoamento monofásico.

Duas ou mais das técnicas supracitadas podem ser utilizadas simultaneamente para gerar uma intensificação maior que aquela produzida por uma única técnica. Isto é conhecido como intensificação composta.

Principais áreas de aplicação

Enquanto as técnicas de intensificação passivas e ativas têm sido estudadas continuamente nos laboratórios, as aplicações práticas tratam, quase que exclusivamente com o formato.

Prova do aumento comercial da tecnologia é mostrado pelos mais de 250 fabricantes que oferecem produtos que variam de tubos de intensificação até sistemas térmicos completos que utilizam esta tecnologia.

Para demonstrar as áreas de aplicação da tecnologia de intensificação, serão consideradas sete áreas industriais. Cada uma destas áreas possui necessidades e restrições específicas de intensificação assim como subprodutos ou custo, que limitam as técnicas passíveis de utilização.

Essas áreas são:

- Aquecimento, refrigeração, ventilação e ar condicionado;
- Automotiva;
- Potência;
- Processos;
- Redução de perdas em trocas de calor;
- Resfriamento aplicado a dispositivos eletrônicos;
- Aeroespacial.

Análise e conclusão

Hoje em dia, intensificadores de troca de calor caracterizam-se pela intensa atividade na pesquisa e utilização industrial. Devido à contínua pesquisa e à bem sucedida experiência prática ao longo dos últimos 25 anos, as técnicas de intensificação são, normalmente, levadas em conta na melhora da transferência de calor convectivo numa larga variedade de equipamentos. As pesquisas atuais são direcionadas, basicamente, mais pelas aplicações do que por desenvolvimento, e quase sempre, envolvem aproximações múltiplas. Em muitos casos, no entanto, resultados analíticos ou numéricos de troca de calor e comportamento viscoso do escoamento ainda não são possíveis e relações empíricas devem ter credibilidade para o projeto. Modelamento deve ser incentivado, no entanto, porque a compreensão do resultado do fenômeno pode resultar em melhores estimativas e configurações de dispositivos inseridos para melhora da superfície.

Em resumo, verifica-se o surgimento de uma poderosa nova tecnologia para melhorar o desempenho de trocadores de calor, e já se dispõe de muita experiência de projeto para a aplicação desta tecnologia.

3. Técnicas experimentais

Técnicas Experimentais

As técnicas experimentais a serem utilizadas, basicamente, subdividem-se em placa aquecida e sublimação do Naftaleno. Com placa aquecida, é possível o uso de termopares ou cristal líquido.

Esquematicamente:

- **Placa Aquecida:**

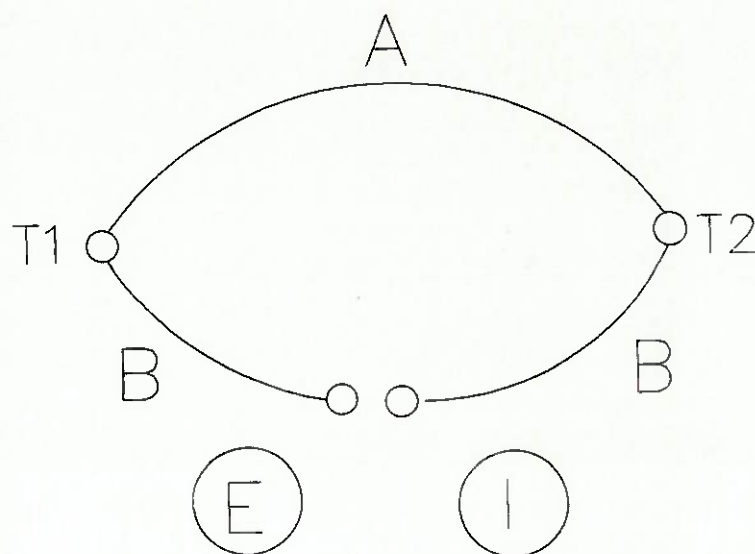
Termopares

Cristal Líquido

- **Sublimação do Naftaleno**

Termopares

Se dois arames de materiais diferentes, A e B, são conectados em um circuito, como na figura abaixo, com uma junção à temperatura T_1 e a outra, T_2 , então, um voltímetro de resistência infinita detecta uma força eletromotriz E , ou, caso seja conectado um amperímetro, uma corrente I poderá ser medida.



A magnitude da voltagem E depende do material e das temperaturas T_1 e T_2 . A corrente I é simplesmente E dividido pelo total de resistências do circuito, incluindo a resistência do amperímetro. Se há passagem de corrente, força elétrica é desenvolvida; isto vem de um fluxo de calor dos arredores dos arames. Desta forma, uma conversão direta de energia térmica em energia elétrica pode ser obtida. O efeito é reversível, assim, forçando a corrente de uma fonte externa através de um circuito termoelétrico, causar-se-á fluxos de calor do circuito e para o circuito.

A relação global entre voltagem E e temperaturas T_1 e T_2 , que é a base da medição termoeétrica de temperatura é chamada "Efeito Seebeck". As temperaturas T_1 e T_2 referem-se às junções, visto que, quando se usa termopares, a tentativa é de medir a temperatura de algum corpo em contato com as termojunções.

Estas duas temperaturas não são exatamente as mesmas se é permitida a passagem de corrente através da termojunção, desde que calor seja gerado ou absorvido na junção, que, conseqüentemente, deve estar mais quente ou mais fria do que o meio ao redor do qual a temperatura está sendo medida. Estes processos de aquecimento e resfriamento são conhecidos com efeito Peltier. Caso a voltagem do termopar seja medida com um potenciômetro, não há fluxo de corrente, e os aquecimentos e resfriamentos de Peltier não estão presentes. Quando é usado um milivoltímetro, há passagem de corrente e calor é absorvido na junção quente (exigindo isto para se tornar mais fria que o meio ao redor), enquanto calor é liberado na junção fria, tornando-a mais quente que o meio ao redor. Estes efeitos de aquecimento e resfriamento são proporcionais à corrente e, felizmente, são completamente desprezíveis quando a corrente é produzida pelo próprio termopar em um circuito prático de milivoltímetro. Estes erros são ainda menores quando o termopar é conectado a um instrumento de amplificação com alta impedância de entrada (1 a 1000 M Ω).

Um outro efeito reversível de fluxo de calor, o efeito Thomson, influencia a temperatura dos condutores entre as junções, em vez das próprias junções. Quando corrente flui através dos condutores que possuem um gradiente de temperatura (e, conseqüentemente, um fluxo de calor) ao longo de seus comprimentos, calor é liberado em qualquer ponto onde o fluxo de corrente esteja na mesma direção do fluxo de calor, e ao mesmo tempo em que calor é absorvido em qualquer ponto onde estejam em direções opostas. Partindo-se do fato de que

este efeito também depende do fluxo de corrente, ele não existirá no caso do uso de um potenciômetro. De qualquer forma, o efeito de fluxo de calor na temperatura do condutor é completamente insignificante. Finalmente, pode-se notar que, em qualquer condutor de corrente, o calor $I^2.R$ é gerado, aumentando a temperatura do circuito acima da do meio ao redor. Novamente, potenciômetro e aparelhos de medição com alta impedância de entrada geram erros desprezíveis. Os erros em circuitos de milivoltímetros também são, geralmente, desprezíveis, mas podem ser estimados, se as condições de transferência de calor forem conhecidas.

Embora muitos materiais apresentem efeitos termoelétricos em vários graus, apenas um pequeno número de pares deles é usado em larga escala. São eles: platina/rodium; cromel/alumel; cobre/constantan e ferro/constantan.

Cada par destes exibe uma combinação de propriedades que se adapta a uma particular classe de aplicação.

A acuracidade dos termopares comuns deve ser citada com especial atenção. Se forem utilizados arames-padrão para termopares (que não são calibrados individualmente pelo fabricante), sem uma pós calibração, estar-se-á contando com o desvio do limite de controle de qualidade do fabricante, que são publicados em tabelas de calibração. Estas dão as características médias e não as de blocos particulares de arames. Platina/platina-ródio é a combinação de maior acuracidade.

Caso melhores acuracidades sejam necessárias, o termopar deverá ser calibrado individualmente.

Fabricantes de termopares têm uma vasta experiência no que concerne à aplicação destes em diversos problemas de medição de temperatura; podem ser consultados em tipos especiais de dúvidas.

O uso de cristal líquido na troca de calor

Introdução

O uso de cristais líquidos em pesquisas e testes vem crescendo largamente. As principais áreas de aplicação são visualização de escoamentos e estudos de transferência de calor, embora este material possa ser utilizado em qualquer estudo envolvendo indicação de campos de temperatura e mapeamento térmico.

Nos últimos anos, um elevado número de pesquisadores no campo de troca de calor e mecânica dos fluidos vem usando cristais líquidos sensíveis à temperatura como um instrumento de medição da mesma, e têm obtido resultados promissores tanto em medições volumétricas como superficiais.

O cristal líquido é conhecido desde 1.888, quando foi descoberto pelo austriaco Friedrich Reinitzer, no entanto, sua aplicação e disponibilidade industrial só se deu em 1.960, com o advento dos dispositivos eletrônicos. Somente nas décadas de 70 e 80, os pesquisadores do ramo aceitaram o cristal líquido como uma legítima técnica de medição de temperatura.

Vantagens no uso de cristal líquido

Os cristais líquidos apresentam importantes vantagens sobre os demais instrumentos de medição:

- Baixo custo de utilização;
- São facilmente manuseáveis;

- Apresentam pequenos e previsíveis efeitos tanto no escoamento como no campo térmico, quando tomados os devidos cuidados;
- A medição se dá quase que instantaneamente e o mostrador é reversível;
- Oferecem satisfatórias acuracidade e resolução.

Os cristais líquidos são particularmente úteis para estudos preliminares de campos térmicos ainda não conhecidos, antes da instalação de sensores e para investigação da dupla-dimensionalidade nos testes de escoamentos.

Classificação

Existem diversos tipos de cristais líquidos. A principal divisão entre eles resulta de dois modos em que pode se dar a ordem molecular de suas partículas. Estes dois grupos principais podem, então, ser subdivididos de acordo com as diferentes estruturas e propriedades.

Os dois tipos principais são: Liotrópicos e Termotrópicos.

Liotrópicos:

São cristais líquidos resultantes da ação de um solvente. Quando certos componentes são tratados com solventes, não é obtida uma solução "verdadeira", e o estado resultante possui características de fase cristalina do líquido. Estas fases dos compostos liotrópicos podem ser destruídas ou convertidas em líquido isotrópico pelo excesso de solvente ou pelo aquecimento das mesmas a temperaturas suficientemente altas. Sabões, vários detergentes e polipeptídeos são materiais que formam cristais líquidos liotrópicos. A maior importância destes materiais está voltada para o campo da biologia.

Termotrópicos:

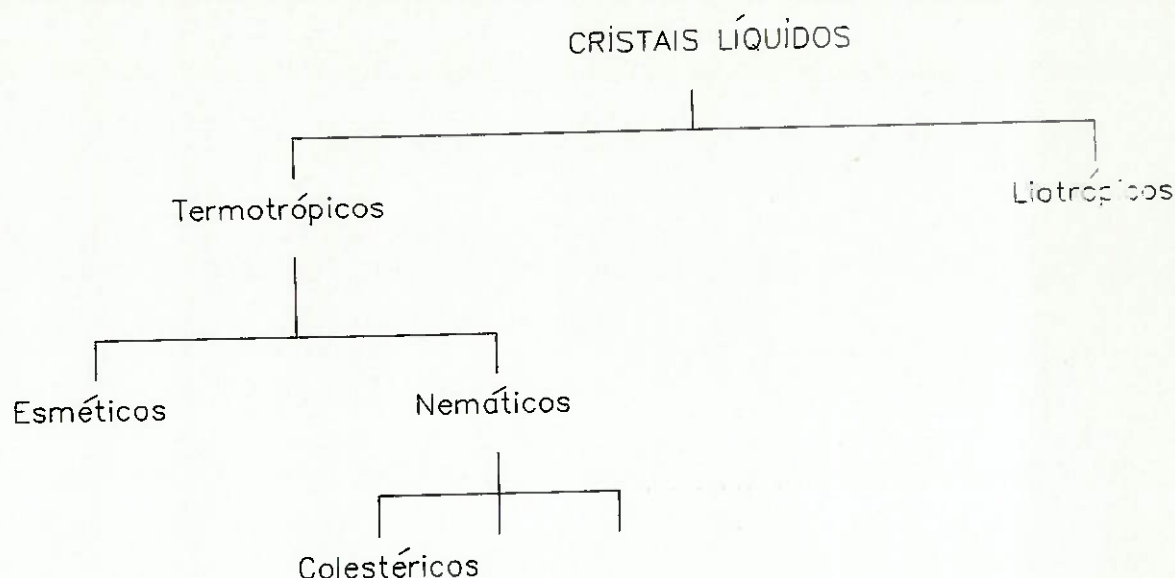
São cristais líquidos cuja mesofase é ativada termicamente e resultam da fusão de sólidos mesogênicos aquecidos a temperaturas acima das quais a estrutura cristalina deixa de ser estável. Geralmente, são classificados de acordo com suas propriedades ópticas e estruturais em três grupos: Esméticos, Nemáticos e Colestéricos.

De um ponto de vista estrutural, pode-se dizer que há apenas dois grandes grupos: nemáticos e esméticos. Os colestéricos, embora apresentem características ópticas diferentes, possuem propriedades termodinâmicas que os classificam como nemáticos. Assim, pode-se considerar os colestéricos como uma subdivisão dos nemáticos. Basicamente, estes dois tipos diferem pela extensão e natureza do arranjo molecular. As moléculas que formam as fases dos cristais líquidos são, geralmente, alongadas e relativamente rígidas. Estruturas cristalinas em formato de discos também existem; fazem parte de moléculas em formato de grandes discos. No entanto, são muito raras.

As mesofases esméticas são caracterizadas não somente pelos seus longos eixos de moléculas paralelas, mas também por uma camada de moléculas centradas gravitacionalmente em um plano bidimensional; o centro de gravidade molecular é móvel em duas direções, resultando em uma característica estrutura em camadas.

Nas fases nemáticas, o grau de aleatoriedade molecular é muito maior do que nas esméticas. Os longos eixos permanecem consideravelmente paralelos, mas o centro de gravidade é móvel em três direções, e nenhum nível discreto de camadas moleculares pode ser identificado.

A classificação em separado dos colestéricos ou nemáticos quirais vem das suas propriedades ópticas diferenciadas que também são responsáveis pelo descobrimento do estado cristalino dos líquidos em 1888.



O material que compõe o cristal líquido é, na verdade, uma substância gordurosa, cuja cor é dependente da temperatura. Este fenômeno se explica pelo fato de que, a estrutura molecular desta substância se altera em presença de temperatura, o que ocorre é um rearranjo molecular.

A cor perceptível é afetada tanto pela temperatura como pela tensão de cisalhamento. O material é posto a trabalhar sob condições inconvenientes devido à sua natural viscosidade, associada ao fato de que a visibilidade da cor é fortemente dependente do ângulo de visão.

Durante a década de 70, foi desenvolvido um processo de micro-encapsulamento, através do qual, acumulava-se pequenas porções de material de cristal líquido em cápsulas gelatinosas

esféricas. Essa cápsulas eram então suspensas em um instrumento para formar uma pintura, a qual seria seca ao ar para tomar consistência. Como consequência deste encapsulamento, a tinta seca deixava de ser tão sensível ao cisalhamento e o efeito de ângulo de visão na percepção das cores também era afetado. Atualmente, o material encapsulado é o modo preferido de aplicação do cristal líquido e, conseqüentemente, todos os resultados apresentados fazem referência a este tipo de utilização. Para aplicações em superfícies, a resistência térmica da camada de pintura de cristal líquido deve ser levada em consideração. A camada pode ser até da espessura de 100 μm , e a partir daí, o efeito passa a ser, muitas vezes, sem importância.

O cristal líquido vem sendo aplicado em escoamentos com ar e água. Com ar, é utilizado para mapear a distribuição da temperatura superficial, tanto qualitativa quanto quantitativamente. Em escoamentos com água, é utilizado quantitativamente nas superfícies e qualitativamente para mostrar a distribuição de temperatura do escoamento propriamente dito, através da suspensão de um material de cristal líquido na água. O peso específico da cápsula de cristal líquido está em torno de 1,02 e, a partir disso, verifica-se que estas ficam neutramente boiando. Apenas uma pequena porção, 0,01 - 0,02 % de peso, é necessária para uma boa visualização.

Escoamentos com água, normalmente, envolvem escalas de tempo de mecânica dos fluidos que possuem ordem de magnitude muito maior do que as encontradas em escoamentos com ar. Nos escoamentos com água, as frequências envolvidas são menores que 10 Hz, enquanto que, nos com ar é possível que se obtenha frequências acima de algumas centenas de hertz. O cristal líquido tem constante de tempo intrínseca de 20 a 50 ms, provavelmente, determinada pela viscosidade do material que o compõe e pela força de seu campo polar.

Assim, cristais líquidos são apropriados para a observação de alguns fenômenos dependentes do tempo na água, contudo, são utilizáveis somente para medições de tempo médio no ar.

A coloração do cristal líquido pode ser usada simplesmente qualitativamente pela observação dos padrões ou quantitativamente, pela calibração da pintura com o uso de uma temperatura conhecida. Para a calibração, podem ser usados dois métodos. São eles:

- **Evento único:** Em calibrações de evento único, uma cor, normalmente o amarelo (ou amarelo esverdeado) é tomada como o marcador do evento e a tinta é identificada por dois valores: a temperatura do evento e a faixa de ambiguidade. A temperatura do evento é aquela correspondente à da cor escolhida e a faixa de ambiguidade é a diferença entre a primeira e a última aparição desta cor enquanto a temperatura é aumentada. Através da distribuição linear de temperatura entre as duas extremas escolhidas, é possível determinar a temperatura do evento e a faixa de ambiguidade em um único experimento. A figura 1 mostra um esquema típico de gradiente linear de calibração, com uma estreita faixa de cristal líquido em processo.

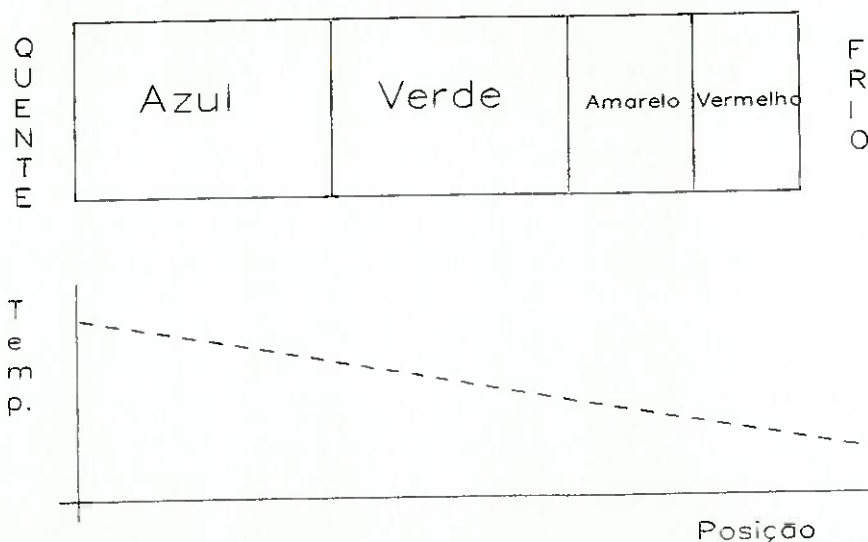


Figura 1.

- **Calibração cromática:** A figura 2 mostra a calibração cromática, na qual o comprimento de onda dominante é determinado como função da temperatura, com o uso do decompositor de cores RGB e do diagrama de cromaticidade. A calibração cromática é feita com uso do sistema de vídeo mostrado na figura 3, cujos resultados são analisados usando o diagrama padrão CIE, mostrado na figura 4. O sistema de vídeo separa a luz, repartindo cada ponto nas suas componentes vermelha, verde e azul, normaliza na intensidade (a soma de R (red - vermelho), G (green - verde) e B (blue - azul)) e localiza o ponto no diagrama cromático. Este diagrama representa todas as cores possíveis em um mapa de duas coordenadas: frações de vermelho versus frações de verde (a fração de azul é então descoberta fazendo-se a soma das três igual a 1,0). A semi-elipse mostrada na figura, indica o espectro saturado de cores. O ponto (0,33; 0,33) representa a luz branca. O triângulo representado mostra o domínio coberto pela fosforescência utilizada no sistema de vídeo. Todos os dados obtidos por este sistema devem localizar-se dentro deste triângulo.

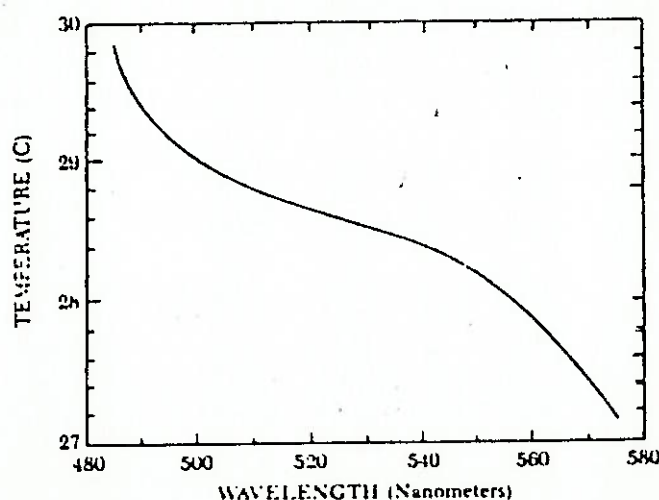


Figura 2.

A figura 5 mostra a concordância atingida com a calibração cromática, em comparação com termopares embutidos. Deve ser enfatizado que esta concordância não representa a acuracidade no campo, exceto sob condições muito bem controladas. Na imagem mostrada, a calibração e a subsequente leitura foram, ambas, feitas com o mesmo tipo de luz, sob o mesmo ângulo e da mesma superfície, usando as mesmas posições relativas. Aplicações de campo podem contar com variações nestes parâmetros, e a acuracidade destes resultados pode acabar por ser inferior às relatadas aqui. Apesar disso, os resultados são bastante promissores.

Tanto largas como estreitas faixas de cristal liquido estão disponíveis, com temperaturas de evento de 20°C até 75°C. Faixas estreitas de pintura são melhor aplicáveis a evento único, enquanto as largas são mais aplicáveis a interpretação cromática. Esta última aplicação associa uma temperatura a cada comprimento de onda (cada nuance) e é mais costumeiramente feita usando o decompositor de cores RGB e processador de imagem ou usando conjuntos de filtros seletores de coloração em um detector sensível a intensidades.

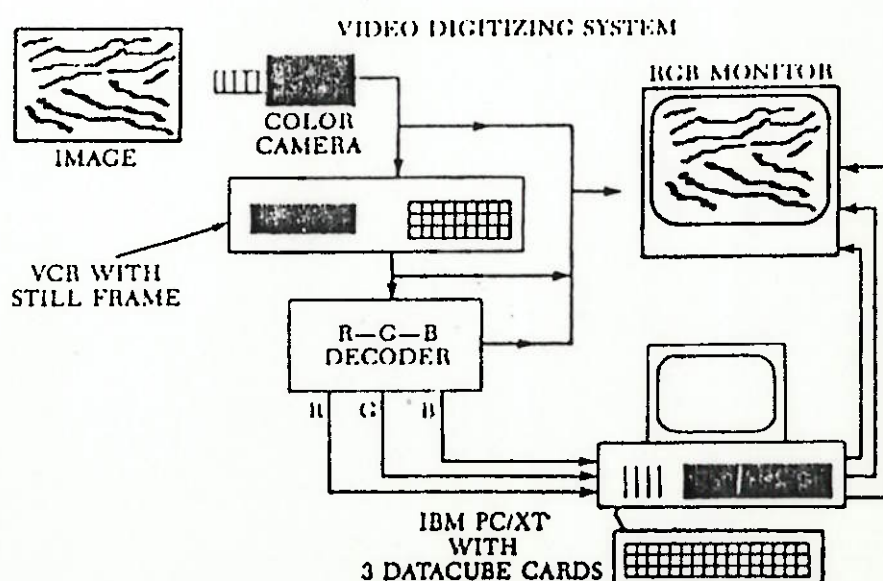


Figura 3.

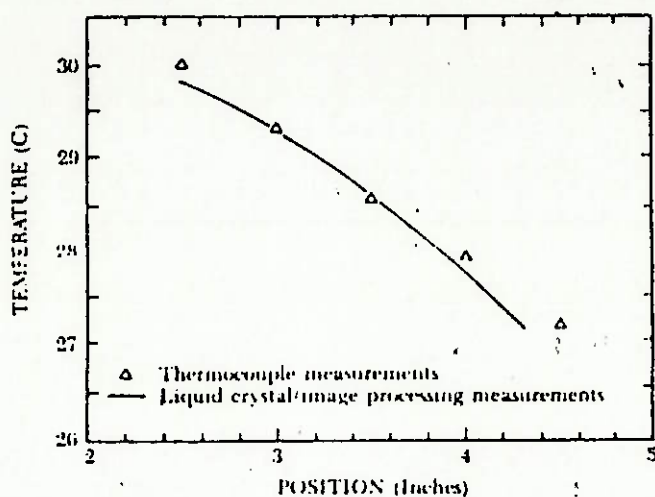


Figura 5.

Propriedades da mudança de cor

A sensibilidade à temperatura de misturas e produtos feitos de cristal líquido (TLC - Thermal Liquid Crystal), têm como características, temperatura e largura da banda de cores, tais como o início do vermelho e o meio do verde.

A largura da banda é definida pela diferença entre o início do azul e o início vermelho.

O jogo de cores de uma mistura de TLC é definido pela especificação tanto das temperaturas de início do vermelho ou do verde, como pela largura da banda. Por exemplo, R35C1W define uma mistura com início do vermelho a 35°C e largura de banda de 1°C; isto é, o início do azul estará 1°C acima, em 36°C. G100F2W define uma mistura de TLC com meio do verde a 100°F e largura de banda (início do vermelho até início do azul) de 2°F.

A insensibilidade de temperatura (corte de sensibilidade) dos TLCs é definida pela especificação da cor e pelo ponto de clareamento (clearing point). Este ponto é determinado pela temperatura acima da qual a cor desaparece, também chamado de temperatura de transição de cristal líquido colestérico para líquido isotrópico. Por exemplo, R50C descreve uma mistura vermelha de TLC com ponto de clareamento de 50°C.

Embora alguns componentes exibam, individualmente, propriedades de mudança de cor acima de 250°C, para aplicações práticas, a faixa de sensibilidade à temperatura dos TLCs disponíveis comercialmente, fica em torno de -30°C a 115°C. Pontos de clareamento, por volta de -20°C a 80°C.

É preciso ressaltar o fato de que o jogo de cores e o ponto de clareamento de todas as misturas de TLC são muito sensíveis e suscetíveis a mudanças durante qualquer passo do processamento a que o material seja submetido. Por isso, deve-se tomar cuidado no manuseio destes materiais.

Aplicação do Cristal Líquido

Para utilização sobre superfícies, o cristal líquido pode ser aplicado com pincel, pulverizador, rolo, pá, silk-screen ou imersão. A superfície deve ser preparada com uma primeira cobertura ("fundo") de tinta preta, para absorção de luz transmitida, através do camada de cristal líquido. Também a luz branca transmitida através do cristal líquido pode ser refletida de volta ao observador, diluindo a intensidade das cores refratadas. É importante, também, que se obtenha uma superfície uniforme na pintura final, pois as asperezas de uma superfície rugosa irão atuar como centros de dispersão e irão refletir luz branca, causando, da mesma forma, o efeito de diluição. Quando a pintura de múltiplo

evento é usada, a espessura da camada deve ser aumentada. Em torno de 30 a 50 μm por evento produz boas imagens.

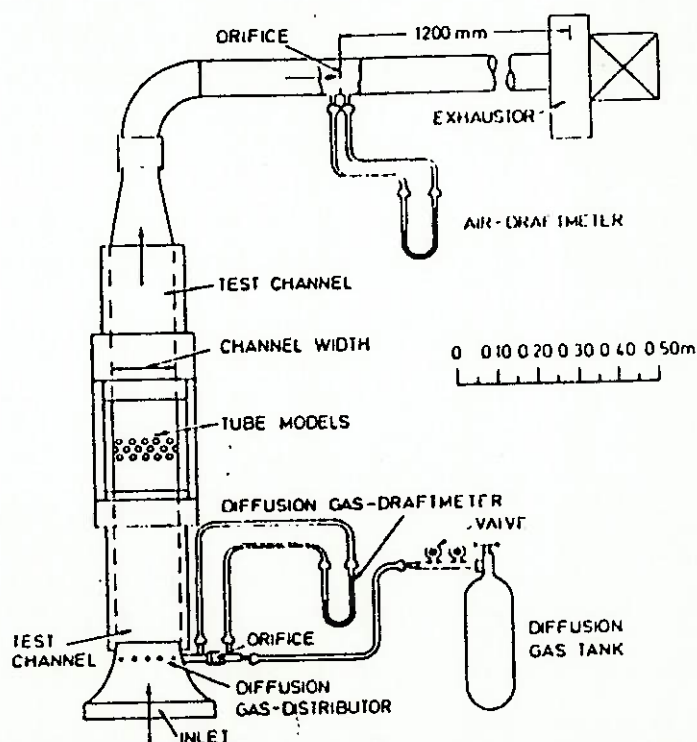
Folhas contendo cristal líquido, compostas por lâminas de policarbonato, geralmente com espessura de 0,1mm, já estão comercialmente disponíveis. Este material pode ser aplicado com leves pressões em um lugar ou uma superfície para visualização da temperatura.

Analógia entre transferências de calor e massa

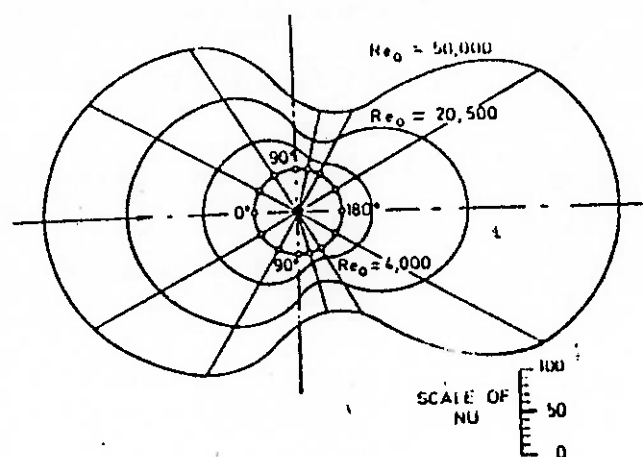
Sublimação do Naftaleno

A primeira pessoa a usar a analogia de transferência de massa para estudo da troca de calor foi Thoma, em 1921. Thoma usou como modelo, fileiras de tubos feitos de papel absorvente (filtro) embebidos em ácido fosfórico. Uma mistura de ar e amônia foi direcionada para os tubos. A amônia foi absorvida tão rapidamente pela superfície dos tubos que sua concentração tornou-se desprezível. A quantidade de amônia transferida para a superfície foi determinada pela titulação do ácido presente no papel filtro. Thoma obteve, deste modo, coeficientes de transferência de calor que, mais tarde, puderam ser verificados como corretos, pelos equipamentos de medição de transferência de calor.

O mesmo método foi utilizado em larga escala por Lohrisch, em um túnel de vento, como pode ser visto abaixo.



Ele verificou, essencialmente, os resultados obtidos por Thoma e também determinou coeficientes locais de transferência de calor fazendo subdivisões em faixas longitudinais no papel-filtro que revestia as superfícies. A figura abaixo mostra estes resultados.



Tanto Thoma como Lohrlich, ambos utilizaram experimentos com transferência de massa para visualização de escoamentos. Nestes casos, a superfície de teste era embebida com ácido clorídrico e o desenvolvimento das nuvens de amônia combinada com cloro podia ser fotografado. O número de Schmidt para difusão da amônia no ar a 0°C é: $Sc = 0.634$. Experimentos realizados a esta temperatura mostram que a relação entre Prandtl e Nusselt é: $Nu \approx Pr^{1/3}$. Com esta relação, o número de Nusselt obtido pela analogia de transferência de massa pode ser generalizado para uma faixa moderada de números de Prandtl.

O estudo de difusão de massa laminar ou turbulenta entre duas correntes de gases diferentes, oferece uma analogia conveniente para a exploração da difusão térmica de uma pluma gasosa com os arredores gasosos.

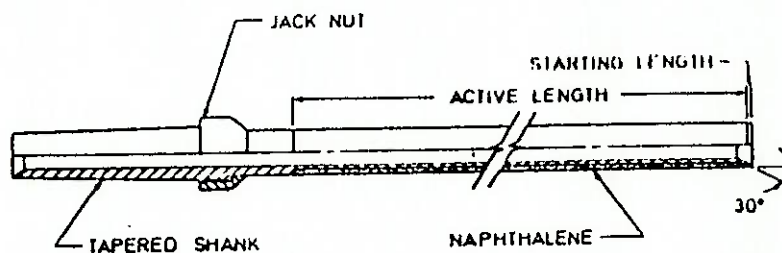
A evaporação do naftaleno tem sido, freqüentemente, utilizada para estudos de analogia de transferência de massa. O método foi introduzido por Jakob e Kezios em 1953, e vem sendo aplicado em uma série de investigações experimentais desde aquela época.

O naftaleno usado é, geralmente, em fase cristal:

Símbolo químico:	$C_{10}H_8$
Peso molecular:	128.2
Ponto de fusão:	entre 79°C e 80°C
Resíduo após ignição:	0.001 %

Certo experimento utiliza o método para obter informações sobre o coeficiente local de transferência de calor ao longo da superfície de um cilindro exposto a um fluxo de ar axial.

A figura seguinte mostra um esboço do cilindro:



O cilindro é oco, ar escoa por dentro dele, entrando por um lado e saindo pelo outro. Deste modo, os efeitos de partida são minimizados. O cilindro-modelo foi construído de aço e dotado de uma fina camada de naftaleno ao longo de toda sua superfície externa. O naftaleno foi fundido no cilindro em um molde de gesso, feito em duas partes para facilitar a remoção do mesmo. A superfície do molde foi coberta com resina epoxi para torná-lo impermeável ao naftaleno derretido e recoberto com uma fina camada de graxa de silicone para prevenir a adesão do cilindro. Tanto o cilindro-modelo como o molde foram pré-aquecidos por vapor, passado por dentro do tubo metálico. O naftaleno derretido é despejado a uma temperatura de 100°C dentro do molde vertical, e então, resfriado através de um gradual gotejamento de água no interior do cilindro, aumentando lentamente o seu nível. Assim, o resfriamento se dá do nível mais baixo, terminando no mais superficial. Desta forma, pode-se obter uma densa camada de naftaleno, com espessura de 25 mm, com tolerância de ± 0.1 mm. O cilindro-modelo foi exposto a uma corrente de ar em um túnel de vento e, depois de um curso, removido; a variação do diâmetro foi medida com um aparelho especial (profilômetro), graduado para 2.5μ . Deste modo, a taxa de evaporação local pode ser determinada. Para evitar uma perda de massa por evaporação, as medidas com o profilômetro foram realizadas em um local reservado, hermético ao ar onde o ar interno estava saturado com vapor de naftaleno. O raio do cilindro alterou-se, durante a experiência, em mais de 40μ .

A experiência pode ser avaliada da seguinte forma: A taxa de evaporação local foi obtida pela medição executada com o profilômetro; a concentração do naftaleno na superfície do cilindro foi dada pela pressão parcial do gás naftaleno através do uso da equação de gases perfeitos onde a pressão parcial é obtida da temperatura da superfície. A temperatura da superfície não foi medida em si, foi assumida, dentro dos limites de acuracidade, como igual à temperatura da corrente de ar. A densidade do naftaleno sólido, que entra no cálculo da

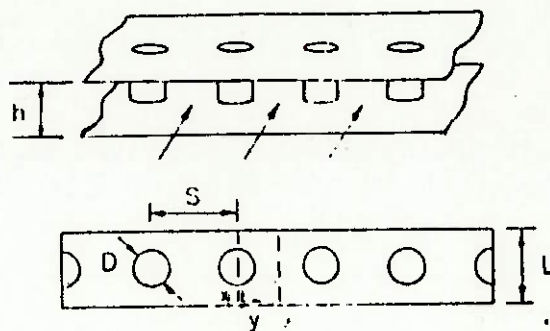
perda de massa, foi obtida pesando-se um pequeno cilindro de naftaleno, moldado da mesma maneira que o cilindro-modelo.

A analogia com transferência de massa fornece vantagens especiais no estudo de transferência de calor na superfície de um disco rotativo, porque a analogia evita medições de temperatura e fluxos de calor que sejam difíceis de se executar numa parte rotativa.

Outra situação onde a analogia com transferência de massa tem utilidade é o caso de transferência de calor, laminar ou turbulenta, em convecção forçada, sobre uma placa lisa com tiras envergadas que são, alternativamente, aquecidas e não aquecidas. As etapas de variação de temperatura associadas à situação são praticamente impossíveis de se obter em um experimento de troca de calor, por causa da condução de calor dentro da placa; no entanto, num estudo com transferência de massa, não apresenta a menor dificuldade.

Estudos de transferência de massa usando evaporação do naftaleno também podem ser usados para simular condições de como ocorrem desgastes por resfriamento. Para este fim, a taxa de evaporação é aumentada através da operação de um túnel de vento, dentro do qual o modelo a altas temperaturas está colocado.

A analogia com transferência de massa, usando sublimação do naftaleno, vem sendo desenvolvida, nos últimos tempos, para uma melhor acuracidade do método. Tem sido aplicada para estudo de transferência de calor local, em um conjunto de aleta e tubos de troca de calor. A figura a seguir mostra este tipo de construção.



Esta geometria estudada possuía os seguintes parâmetros:

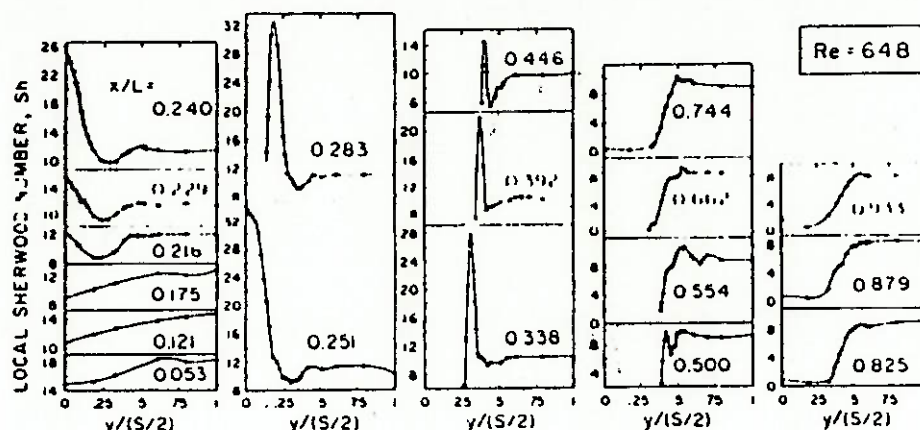
$$h/D = 0.193$$

$$S/D = 2.5$$

$$L/D = 2.16$$

Passagens de troca de calor foram simuladas na analogia com o uso de duas placas de naftaleno com discos circulares feitos de "Delrin", usados para modelar os tubos. A placa de naftaleno foi fundida em um molde de alta acuracidade. Foi polida e teve suas superfícies lapidadas. Todas as partes foram removidas com o uso delicado de um martelo e sem o uso de qualquer lubrificante. O ar da sala foi todo sugado através do conjunto, como mostrado na figura anterior. Depois de um certo tempo de teste, apropriado, o experimento é desmontado e então, a sublimação local do naftaleno pode ser medida por um preciso sensor. A taxa total de desgaste obtida pela integração destes valores locais vai de encontro com os valores obtidos pela pesagem independente deles, com erro dentro de 1% ou 2%. Coeficientes de transferência de massa foram determinados levando-se em conta que a taxa de desgaste local por unidade de área estava dividida pela diferença de concentração na superfície e a concentração total na respectiva seção de escoamento. A concentração da superfície foi obtida através da temperatura do ar que entrava no aparelho. Um cuidado especial foi tomado na obtenção de um valor preciso desta temperatura, porque a pressão do vapor de naftaleno é muito sensível à temperatura com variação em torno de $10\%/^{\circ}\text{C}$, à

temperatura ambiente. O número de Sherwood local $Sh = h_m \cdot D_h / D$ foi obtido dos coeficientes de transferência de massa, com h_m denotando o coeficiente de transferência de massa; D_h , o diâmetro hidráulico e D , o coeficiente de difusão de massa. O diâmetro hidráulico D_h é definido como: $D_h = 4 \cdot A_c \cdot L / A$, onde A_c é a mínima área de escoamento; L , a largura percorrida pelo fluxo (ver figura) e A é a área da superfície de transferência. O número de Reynolds, baseado no diâmetro hidráulico, varia em torno de 150 a 1270. A figura abaixo mostra um exemplo dos resultados obtidos.



Ela mostra o número local de Sherwood em duas coordenadas, para um número de Reynolds de 648. É interessante notar os picos no número de Sherwood, causados por um vórtex formado nas 'esquinas' entre os discos e as placas. Na região atrás dos discos, a transferência de massa é quase zero. O número de Sherwood pode ser convertido no número de Nusselt pela relação de analogia. Dentro em breve, a analogia com transferência de massa será capaz de obter informações detalhadas dos coeficientes de um campo de troca de calor bidimensional, com geometrias mais complexas do que trocadores de tubos e aletas.

Transferência de Calor Convectiva

Analogia com transferência de massa para fluidos com propriedades constantes

O escoamento de um fluido com propriedades constantes é descrito pelas equações da continuidade e de Navier-Stokes. Serão demonstradas aqui, em coordenadas cartesianas e com parâmetros adimensionais. Estes parâmetros serão denotados por uma "linha". As três coordenadas serão indicadas por: x_1' , x_2' , x_3' , ou de maneira genérica: x_i' ou x_j' , onde i e j variam de 1 a 3. O mesmo ocorrerá com os demais componentes das equações.

Desta maneira, as equações de momentum e continuidade tomarão as formas:

$$\frac{\partial(v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad 01$$

$$\frac{Dv_i}{d\mathfrak{z}} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re_o} * \frac{\partial}{\partial x_j} * \left[\left(1 + \frac{\varepsilon}{\nu} \right) * \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad 02$$

O termo Re_o é baseado nos parâmetros de referência $Re_o = \frac{v_o' * L_o'}{\nu}$ onde ν indica a viscosidade cinemática, ε denota a difusividade turbulenta de momentum. A relação seguinte pode ser derivada de considerações similares ou por experimentos:

$$\frac{\varepsilon}{\nu} = f(Re_o, x_i) \quad 03$$

Esta pode, ainda, ser influenciada pelas características turbulentas do escoamento ou pela rugosidade das superfícies envolvidas.

É preciso salientar que, para um fluido de propriedade constante, o processo de escoamento é completamente descrito pelas duas primeiras equações e pelas suas correspondentes condições de contorno. Isto significa, por exemplo, que o processo de escoamento é completamente independente do fato de a transferência de massa ou calor estar ocorrendo ou não.

Um determinado campo experimental de escoamento, isotérmico, com um único fluido, permaneceu inalterado, quando transferência de calor ou massa foi adicionada ao processo de escoamento.

Agora, considerando um processo de troca de calor adicionado a um campo de velocidades, obtém-se:

$$\frac{Dt}{dS} = \frac{1}{Re_0 \cdot Pr} \cdot \frac{\partial}{\partial xi} \left[\left(1 + \frac{\varepsilon}{\nu} \cdot \frac{Pr}{Pr_t} \right) \cdot \frac{\partial t}{\partial xi} \right] \quad 04$$

O parâmetro Pr indica o número de Prandtl de um fluido ($Pr = \nu \div \alpha$, onde α é o coeficiente de difusividade térmica do fluido) e o número de Prandtl turbulento é definido de maneira semelhante, pela razão da difusividade turbulenta ε para o momentum, pela difusividade turbulenta ε_H para calor: $Pr_t = \varepsilon \div \varepsilon_H$.

O número de Prandtl turbulento é dado pela relação:

$$Pr_t = f(Re_0, Pr, xi) \quad 05$$

Esta, também, obtida por relações experimentais. Em adição, ela é ainda influenciada pela turbulência em contra corrente e pela rugosidade superficial.

De acordo com as relações anteriores, chega-se ao número local de Nusselt:

$$Nu = f(Re_o, Pr, xi) \quad 06$$

Considerando agora, um processo de transferência de massa em um escoamento monofásico, com dois componentes, adicionado a um campo de velocidades, chega-se à equação:

$$\frac{Dw}{d\xi} = \frac{1}{Re_o * Sc} * \frac{\partial}{\partial xi} * \left[\left(1 + \frac{\varepsilon}{\nu} * \frac{Sc}{Sct} \right) * \frac{\partial w}{\partial xi} \right] \quad 07$$

onde w é um adimensional que representa a fração de massa de um dos componentes.

$Sc = \nu \div D$ é o número de Schmidt onde D representa o coeficiente de difusão binário de massa e $Sct = \varepsilon \div \varepsilon_m$ é o número de Schmidt turbulento onde ε_m indica a difusividade turbulenta para massa. Assume-se que as variações de propriedades são desprezíveis.

Uma análise dimensional requer que o número de Sherwood local, definido pelo produto do coeficiente de transferência de massa h_m pelo comprimento de referência L_o divididos pelo coeficiente de difusão de massa D , seja expresso da seguinte forma:

$$Sh = f(Re_o, Sc, xi) \quad 08$$

O fato de as equações 04 e 07 serem do mesmo formato, permite que uma importante conclusão seja tomada. Para este propósito, é útil que se tenha consciência de que todos os experimentos disponíveis evidenciam pontos tais como:

$$Sc_t = Pr_t$$

09

ou, em outras palavras, a equação 08 descreve o número de Schmidt turbulento da mesma maneira que a equação 05 descreve o de Prandtl. Com isto em mente, a equação 07 pode ser transformada na 04 simplesmente substituindo-se w por t e Sc por Pr . A partir disto, segue-se que para qualquer configuração geometricamente semelhante e para condições de contorno também similares, uma equação da forma da 08 pode ser obtida da correspondente 06, se forem substituídos nesta equação o número de Nusselt pelo de Sherwood e o de Prandtl pelo de Schmidt.

Análises dimensionais também podem ser feitas para descrição de transferência de calor por convecção natural para fluidos com pequenas variações de propriedades, utilizando-se transferência de massa por convecção natural em um fluido isotérmico de dois componentes, onde as propriedades destes dois diferem muito pouco. O resultado é, novamente, a simples relação existente entre o número de Sherwood descrevendo o processo de transferência de massa e o de Nusselt descrevendo o processo de troca de calor.

O número local de Sherwood Sh pode ser demonstrado como função do número de Grashof G_{rom} , baseado em parâmetros de referência: número de Schmidt Sc e coordenada xi que determina o local em consideração da superfície do objeto onde a transferência de massa ocorre:

$$Sh = f(Gr_{om}, Sc, xi) \quad Sh = f(Ra_{om}, Sc, xi) \quad 10$$

Mais recentemente, o número de Rayleigh $Ra_{om} = Gr_{om} * Sc$ vem sendo usado no lugar do número de Grashof, por causa do número de Sherwood e também, pela transição para turbulência que dependem muito menos do número de Schmidt quando é expresso pelo número de Rayleigh do que quando expresso pelo número de Grashof.

A analogia entre transferência de calor e massa conduz novamente ao resultado que, para qualquer geometria fixada e para condições semelhantes de contorno, uma equação descrevendo transferência de calor pode ser obtida da 10, quando o número de Sherwood é substituído pelo de Nusselt, o de Grashof ou de Rayleigh para transferência de massa, pelos respectivos Gr e Ra para transferência de calor e o número de Schmidt pelo de Prandtl.

$$\begin{array}{ccc} Sh = f(Gr_{om}, Sc, xi) & Sh = f(Ra_{om}, Sc, xi) & \\ \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow & \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow & \\ Nu \quad Gro \quad Pr & Nu \quad Rao \quad Pr & 12 \end{array}$$

Na derivação da analogia de transferência de massa, pode-se considerar as equações 01, 02, 04 e 07 descrevendo processos de transferência de calor e massa, mesmo quando a contribuição turbulenta, expressa pela difusividade ϵ é desprezada. Neste caso, as equações descrevem, em princípio, a variação da velocidade turbulenta em função do tempo, temperatura e campos compostos, quando aplicadas as condições de contorno apropriadas. Este fato deve ser bem ressaltado: o cuidado a ser tomado na consideração das semelhanças das condições de contorno.

A analogia de troca de massa pode ser usada nos dois sentidos: obter informações sobre troca de calor através de experimentos com troca de massa ou informações de troca de massa, utilizando experimentos com transferência de calor. Isto se deve ao fato de que, por exemplo, em alguns casos, o processo de transferência de massa pode ser montado com condições de contorno mais claras e assim, pode ser estudado com maior facilidade e acuracidade do que o correspondente processo de troca de calor. Em outros casos, o fato pode se repetir, no entanto, sendo mais fácil o estudo de troca de calor.

4. Viabilidade das técnicas de medição

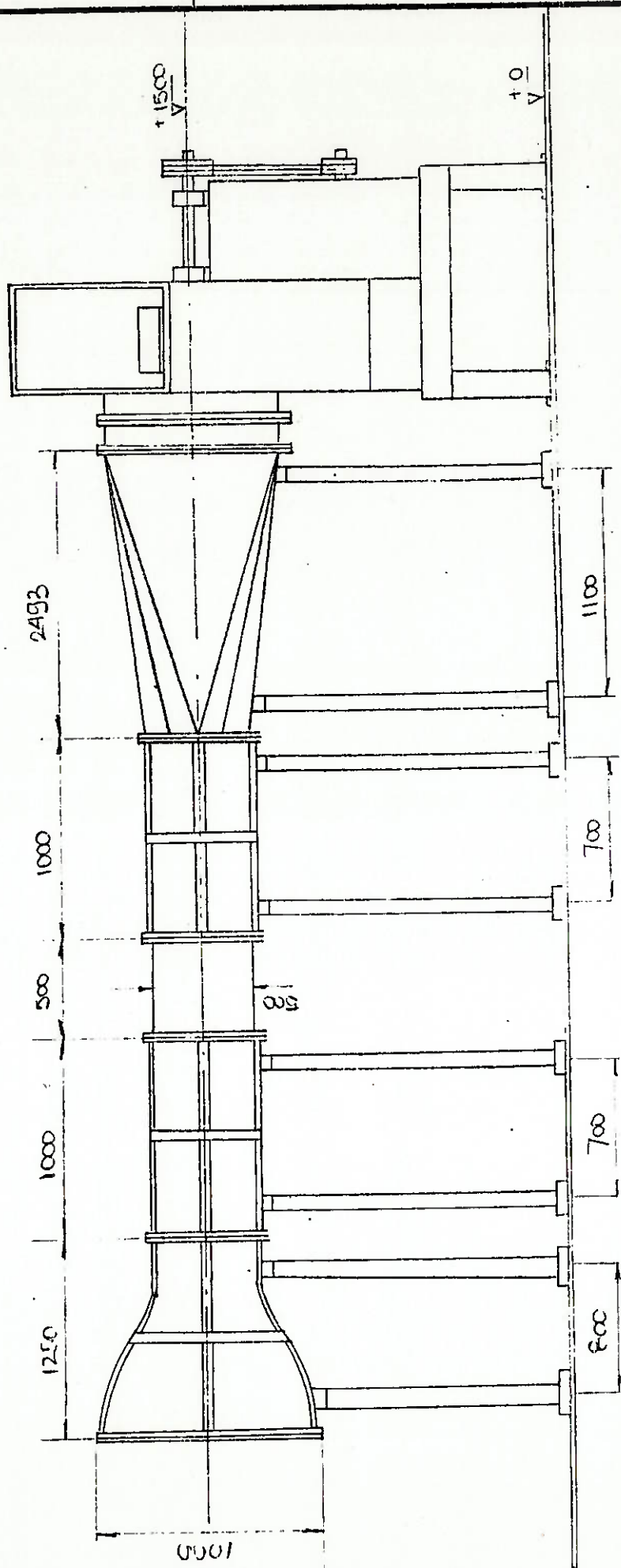
Viabilidade das técnicas de medição

O desenvolvimento de trocadores de calor mais compactos e eficientes vem ocorrendo de maneira bastante rápida, nestes últimos anos, com base em dois pontos principais: redução de espessura das aletas e, também, de suas superfícies estruturais, através de métodos de corrugação. Para que se possa avaliar esta evolução, surge a necessidade de desenvolvimento de aparatos experimentais que realizem medições dos efeitos destes processos, com o intuito de aprimorá-los cada vez mais.

Com esta finalidade, serão apresentados a seguir, três esboços de soluções simplificadas de aparatos, utilizando as técnicas estudadas nos capítulos anteriores deste trabalho. Serão ressaltadas, tanto vantagens, como desvantagens de cada método e então, a técnica escolhida será melhor detalhada. Nesta seleção também serão levadas em conta as disponibilidades de materiais e seus custos de aquisição.

A Escola Politécnica possui um túnel de vento (construído por alunos, como trabalho de formatura), como ilustrado na figura 1. Sua seção de testes possui dimensões: 500 X 500 X 500 mm.

O aparato será acoplado a este túnel, e será utilizado para estudo de problemas com evaporadores. Com base nesta informação, os dados utilizados para o modelo foram tomados de casos reais, através do qual foi realizada a análise dimensional e a escolha dos parâmetros para o projeto.



(mm)

Técnica de Placa Aquecida com uso de Termopares

O princípio de funcionamento de termopares é bastante simples. Tem por base fenômenos termoelétricos, tais como:

- Efeito Seebeck : A formação de diferença de temperatura entre dois materiais diferente provoca energia elétrica.
- Efeito Thomson : Fluxo de calor por um ponto num conduto homogêneo provoca o aparecimento de uma força eletromotriz.
- Efeito Peltier : Dois materiais diferentes, unidos em dois pontos a temperaturas diferentes, dão origem a uma força eletromotriz que depende desta diferença de temperaturas.

Assim, o termopar funciona como transdutor, através da utilização da força eletromotriz como medida de temperatura (proporcional).

Termopares apresentam bons resultados e podem ser aplicados à situação presente.

Como desvantagens, apresentam-se fatos tais como a necessidade de isolamento e o aquecimento da placa (aleta). Outros pontos negativos são as fontes de erro que podem afetar as medidas realizadas com termopares:

- Falta de suficiente isolamento elétrico entre as junções.

- Força eletromotriz alterada por contaminação química dos elementos do termopar, inclusive corrosão.
- Radiação sobre a junção faz com que a temperatura seja diferente da do meio.
- Condução pelo fio do termopar altera a temperatura do meio.

Termopares possuem, como principais vantagens, baixo custo de aplicação (com relação aos demais métodos), facilidade de utilização, além de resultados satisfatórios.

Um modelo simplificado para o aparato poderia ser feito da seguinte maneira:

Uma placa de aço inoxidável com, aproximadamente, 1,0 mm* de espessura. Termopares do tipo Cobre/Constantan de 0,06 mm de diâmetro podem ser aplicados no verso da chapa. A distribuição dos mesmos deve ser feita de acordo com a posição do cilindro, rodeando-o, devido à variação de transferência de calor ocorrida em torno do tubo (como poderá ser verificado, mais adiante, através do relato de Sparrow, para a região adjacente entre cilindro e placa).

O aquecimento do aparato será feito por meio de resistências elétricas colocadas no interior do tubo, mantendo temperatura constante, ao longo de cada tomada de dados.

A figura 1, a seguir, esboça de modo simplificado, esta distribuição:

* A aleta original possui, aproximadamente, 0,127 mm de espessura. No entanto, no caso do aparato experimental, seria inviável uma chapa tão fina. Há a necessidade de uma maior espessura que confira melhor resistência mecânica à mesma.

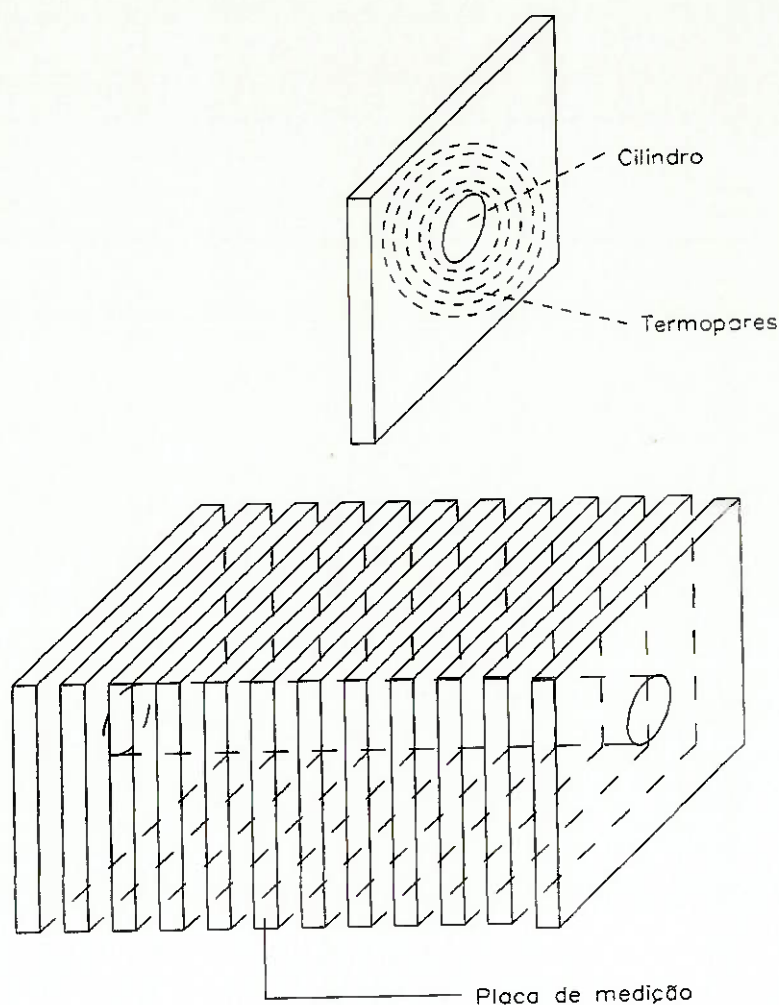


Figura 1.

As distribuições de temperatura são tomadas em todas as direções, devido ao posicionamento circunferencial dos termopares, ao redor do cilindro.

As incertezas do método podem ser avaliadas através da combinação das demais incertezas, além de perdas por radiação e condução.

Técnica de Placa Aquecida com uso de Cristal Líquido

Devido à possibilidade de visualização das variações de forma contínua, através do mapeamento da distribuição de temperatura, o cristal líquido vem se tornando um importante instrumento de medição na área de transferência de calor.

O cristal líquido apresenta muitas outras vantagens com relação aos demais aparelhos de medição. É um instrumento de fácil manuseio, influi muito pouco e de maneira previsível na medição, seus resultados são, praticamente, instantâneos além de apresentar satisfatórias acuracidade e resolução.

Em contra-partida, o uso do cristal líquido apresenta como desvantagem principal o custo dos equipamentos necessários à complementação de sua análise. Foi este fato que fez com que o material só fosse usado em 1.960, com o advento dos dispositivos eletrônicos.

Mesmo assim, a variação de cor pode ser analisada qualitativamente, através da observação dos padrões. Neste caso, não há a necessidade de equipamentos auxiliares.

No entanto, para uma análise quantitativa, seria necessária a calibração da pintura, com o uso de uma temperatura conhecida. Para tal, necessita-se de aparelhos sofisticados, tais como o decompositor de cores RGB (Red-Green-Blue), responsável pela separação da luz nas suas componentes vermelha, verde e azul; um sistema de vídeo e um micro-computador.

Para sua utilização, o cristal líquido poderia ser aplicado sobre a placa - uma folha de material - que então demonstraria, visualmente, a variação da temperatura ao longo da

superfície. Folhas de cristal líquido com 0,1 mm de espessura já estão disponíveis comercialmente, além de serem de fácil instalação.

Um aparato experimental utilizando folhas de cristal líquido requer uma estrutura externa da seção de testes diferenciada das demais. Neste caso, em particular, como não se tem acesso aos equipamentos necessários a uma análise quantitativa dos resultados, a única forma de aplicação do método seria de forma qualitativa, através da visualização da folha. Para isso, a estrutura da seção de testes deveria ser construída em acrílico, pois este material resiste às temperaturas de teste, além de permitir a visualização do experimento no seu decorrer, sem necessidade de interrupções e, portanto, sem interferir nos resultados. A grande desvantagem é a impossibilidade de obtenção de valores precisos. No entanto, este método pode ser utilizado como auxiliar, juntamente com outras técnicas. Sua resposta é quase imediata, o que contribui muito para um primeiro estudo de transferência de calor, quando os resultados ainda estão bastante distantes daquilo que se deseja.

Técnica de Sublimação de Naftaleno

O uso de sublimação de naftaleno para a medição de coeficientes de transferência de calor, via analogia com transferência de massa, confere resultados mais precisos, com alta acuracidade e alto grau de resolução, bastante superior aos demais métodos.

Os números adimensionais obtidos no processo de transferência de massa podem ser convertidos em números de transferência de calor via analogia, por exemplo, o número de Sherwood obtido por transferência de massa pode ser transformado no número de Nusselt para transferência de calor.

Outras vantagens são a ausência de perdas externas, como ocorre na transferência de calor através de condução, e, tomando-se as devidas precauções, a facilidade na obtenção das condições de contorno apropriadas, que são análogas à temperatura uniforme de parede, no correspondente problema de troca de calor.

Devido às inúmeras vantagens deste método e ao fato de a Escola Politécnica possuir uma mesa de coordenadas tridimensionais, capaz de realizar com precisão a leitura da placa de naftaleno, este método foi escolhido e, por tanto, será desenvolvido no decorrer deste trabalho.

5. Estudo aplicado à técnica de sublimação de naftaleno

Sublimação e Naftaleno

Simplificadamente, sublimação é a vaporização de uma substância em estado sólido para estado gasoso, sem a formação de uma fase líquida intermediária.

Para que a vaporização ocorra, as pressões de vapor dos componentes de sublimação têm que ser maiores que as pressões parciais na fase gasosa em contato com o sólido. Algumas substâncias têm pressões de vapor suficientemente altas para sublimar sob condições atmosféricas. Por esta razão, sublimação deve ser acompanhada por aquecimento do sólido, controle do desenvolvimento da gaseificação ou ambos, dependendo do tipo de aplicação do fenômeno.

O naftaleno é um hidrocarboneto aromático $C_{10}H_8$ com propriedades adequadas a este fim.

Suas características químicas são:

- Ponto de fusão : 80 °C
- Peso molecular : 128,16
- Ponto de ebulição : 218 °C
- $Sc = (v/D)$: 2,3
- $K = (Pr/Sc)$: 1.860
- Densidade : 1.145,0 kg/m³

Impurezas

É certo que existem impurezas misturadas ao naftaleno, que podem influenciar nas etapas de medição. No entanto, no processo de aquecimento e fusão as partículas podem ser

separadas por métodos tradicionais. Aquelas de maior volatilidade que o naftaleno, também estão presentes, porém em quantidades desprezíveis. Mesmo assim, no processo de fusão elas são praticamente eliminadas.

Processo de sublimação no experimento

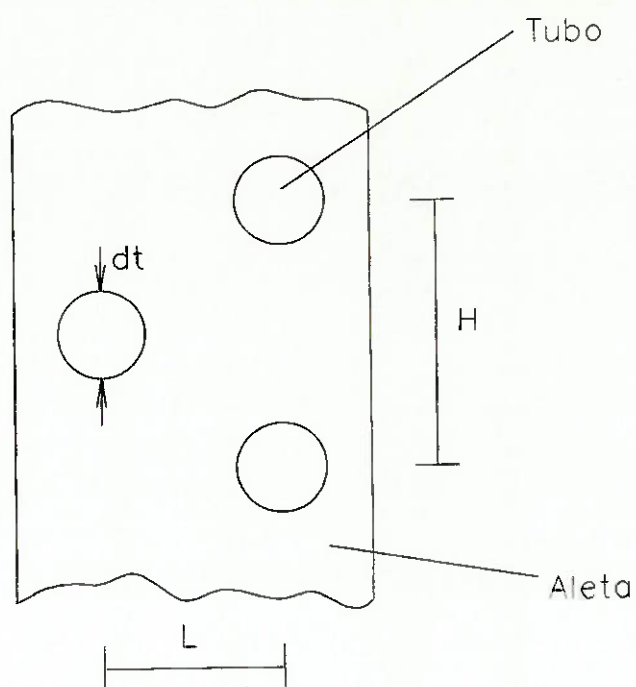
Quando o modelo de naftaleno é colocado no interior do túnel de vento, o processo de transferência de massa por sublimação é guiado pela diferença de concentração entre a superfície do naftaleno e a corrente de ar. A concentração de naftaleno no ar é considerada, inicialmente, igual a zero, e a transferência de massa é proporcional à pressão de vapor do naftaleno.

É preciso lembrar que a pressão de vapor do naftaleno é muito sensível à temperatura, com variação em torno de $10\% / ^\circ\text{C}$, à temperatura ambiente. Por este motivo, deve-se evitar ao máximo a exposição do modelo ao ar, em condições que não as do experimento.

Quanto às incertezas, seus maiores valores estão associados às variações de temperatura ambiente, além daquelas associadas à medição da espessura da camada de naftaleno.

Análise Dimensional e Teoria de Semelhança

- *Caracterização geométrica da aleta:*



$H = 26 \text{ mm}$ (distância entre centros - horizontal)

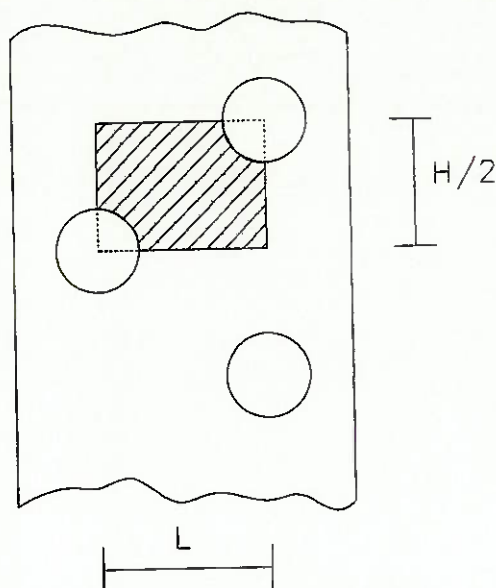
$dt = 9,0 \text{ mm}$ (diâmetro dos tubos)

$L = 19,5 \text{ mm}$ (comprimento característico)

A distância entre duas aletas subsequentes é: $da = 1,8 \text{ mm}$.

É importante ressaltar que estas dimensões foram obtidas através de medições na aleta real.

- *Cálculo da área mínima livre de passagem:*



$$A_T = 2 * \left[L * \frac{H}{2} - \frac{1}{2} * \frac{\pi * d_i^2}{4} \right] + \frac{\pi * d_i}{2} * d_a$$

$$A_T = 468,83 \text{ mm}^2$$

- *Diâmetro hidráulico:*

É a dimensão significativa no caso de escoamento em condutos e pode ser definido como:

$$D_H = 4 * \frac{\text{Área da seção transversal de escoamento}}{\text{Perímetro molhado}}$$

Neste caso:

$$D_H = 4 * \frac{A_{\text{livre}}}{A_{\text{total}}} * L = \frac{4 * 7,2 * 19,5}{468,83} = 1,2 \text{ mm}$$

$$D_H = 1,2 \text{ mm}$$

De acordo com o modelo real, uma aleta com 280 mm de comprimento suporta 22 tubos. Logo, neste caso, um comprimento de 355,6 mm comportará 28 tubos.

O número de passagens para o ar será:

- 201 colunas
- 14 passagens de ar / coluna
- 2.814 passagens de ar

A área de cada passagem será: $(H - dt) * da = 30,6 \text{ mm}^2$

A área de passagem total do ar será: passagens de ar * área individual = 86.108,4 mm²

A vazão de ar é dada por: $Q = V * A$, onde V é a velocidade do ar e A é a área total. Sabe-se que a vazão no evaporador é: 0,1298 m/s. A partir destas informações, chega-se à velocidade do escoamento: $V = 1,5 \text{ m/s}$.

$$Re = \frac{V * D_H}{\nu}$$

$$Re = 106,9$$

Número de Stanton (St):

Utilizando a relação entre atrito superficial e transferência de calor, obtém-se a equação:

$$Stx * Pr^{2/3} = 0,332 * Re x^{-1/2}$$

Assim:

$$Stx = 0,0396$$

• *Teoria de semelhança:*

Para esta análise serão utilizados números adimensionais convenientes, tais como:

$$\text{Re} = \frac{V * D_H}{\nu} \quad \text{St} = \frac{h}{\rho * V * c_p} \quad \text{Pr} = \frac{c_p * \mu}{k}$$

Admitindo uma escala 1:10 entre realidade e protótipo, obtém-se valores adequados para o aparato no túnel de vento:

Dimensões (mm)	Evaporador real	Protótipo
H	26	260
L	19,5	195
da	1,8	18
dt	9,0	90

$$A_{\text{livre}} = \left(\frac{H}{2} - dt \right) * da$$

$$A_{\text{livre}} = 720 \text{ mm}^2$$

$$A_T = 2 * \left[L * \frac{H}{2} - \frac{\pi * dt^2}{2} * \frac{1}{2} \right] + \frac{\pi * dt * da}{2}$$

$$A_T = 46.883 \text{ mm}^2$$

$$D_H = 4 * \frac{A_{\text{livre}}}{A_T}$$

$$D_H = 12,0 \text{ mm}$$

Mantendo-se o mesmo coeficiente h de troca de calor:

Adimensionais (mm)	Evaporador real	Protótipo
St	0,0396	$h/\rho \cdot V \cdot c_p$
Pr	0,73	0,73
Re	106,9	$V \cdot D_H / \nu$

Cálculo de h a partir de St do evaporador:

$$h = 0,0396 \cdot \rho \cdot c_p$$

$$h = 69,85 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C}$$

Cálculo da velocidade do escoamento no protótipo:

Utilizando a mesma relação anteriormente aplicada: $Stx \cdot Pr^{2/3} = 0,332 \cdot Re x^{-1/2}$, chega-se a $V = 15 \text{ m/s}$.

Assim, os valores para o protótipo são:

$$D_H = 12,0 \text{ mm}$$

$$V = 15,0 \text{ m/s}$$

$$Re = 10.688$$

$$Pr = 0,73$$

$$St = 0,004$$

Tempo de tomada de dados

O naftaleno é bastante sensível às condições do meio em que se encontra. Com relação à temperatura, sua pressão de vaporização varia 10% / °C. Por esta razão, é difícil avaliar com precisão o tempo para cada tomada de dados.

É possível fazer uma estimativa deste valor, levando-se em consideração as condições esperadas para o experimento, como mostrado a seguir.

Dados do aparato e supondo temperatura de experimento em torno de 25 °C:

$$D_H = 12 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$Re = 10.688 \text{ (com } V = 15 \text{ m/s)}$$

$$Sc = 2,3$$

$$D_{AB} = 7,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Com as correlações a seguir:

$$Nu = 0,664 \cdot Re^{1/2} \cdot Sc^{1/3} \text{ (para Re laminar)}$$

$$Nu = \frac{k_c \cdot D_H}{D_{AB}}$$

$$Na = k_c \cdot (C_{a,s} - C_{a,\infty})$$

onde: Na = Taxa de difusão molecular (mol/s.m²)

k_c = coeficiente de transferência de massa

$C_{a,\infty}$ = concentração de naftaleno ao longe, adotada como nula

$C_{a,s}$ = concentração de naftaleno na superfície (mol/m³)

$$Ca,s = \frac{pa}{R*T}$$

$$t = \frac{\rho * e}{N_A * M}$$

A pressão de vaporização do naftaleno para as condições assumidas é, aproximadamente, $p_A = 0,0429 * 10^5$ Pa. ρ é a densidade do naftaleno: 1.145 kg/m^3 . A massa molecular é 128,16.

Supondo-se que a espessura a ser sublimada é de $100 \text{ }\mu\text{m}$, chega-se a um tempo final de sublimação variando de 18 a 25 minutos, aproximadamente. Este cálculo torna-se um pouco vago devido a dois fatores principais: O primeiro deles é a incerteza nas condições ambientais durante o experimento, que influenciam significativamente nos valores obtidos, como mostrado pelas relações anteriores. O segundo ponto ressalta o fato de que, na realidade, não é a totalidade desta espessura que será sublimada. A sublimação ocorrerá de maneira diferenciada ao longo da superfície, demonstrando assim, a variação dos coeficientes locais de transferência de massa e, via analogia, de transferência de calor.

Transferência de calor adjacente à extremidade do cilindro em escoamento cruzado

Introdução

Um cilindro em fluxo cruzado é uma das configurações mais encontradas em transferência de calor e, como consequência, é uma das mais estudadas.

Em geral, uma ou ambas as extremidades do cilindro são fixadas perpendiculares a uma parede.

Na interface do cilindro com a parede, e se estendendo ao longo do mesmo, o fluido que passa interage com a camada limite adjacente à parede. As ramificações de transferência de calor oriundas desta interação vêm sendo muito estudadas, especialmente em conjunto com aplicações tais como aletas e feixes de tubos.

Um ponto de início lógico para o estudo de interações parede-cilindro é o caso de um único cilindro em fluxo cruzado. Além disso, para assegurar que a medição do coeficiente de transferência de calor na extremidade do cilindro reflita verdadeiramente a interação parede-cilindro, este último deve ser longo o suficiente para que os acontecimentos termo e hidrodinâmicos na outra extremidade, não influenciem nos fenômenos da região de interesse.

O problema da interação parede-cilindro em feixes de tubos requer estudos mais específicos, no entanto, importantes conclusões a respeito destes efeitos podem ser tomadas guiadas pelos resultados obtidos no caso de um cilindro único.

O experimento descrito a seguir, foi relatado por E. M. Sparrow, T. J. Stahl e P. Traub em meados de 1.984. Tendo em vista estes resultados, será possível a obtenção de diversas informações necessárias ao desenvolvimento do projeto de um aparato experimental baseado no princípio de sublimação de naftaleno como elemento de medição.

O experimento realizado deu-se com um único cilindro em fluxo cruzado, com uma de suas extremidades afixada perpendicularmente à parede de um túnel de vento e a outra, livre. O comprimento do cilindro era tal a ponto de impedir que houvesse interação entre os efeitos de ambas as extremidades.

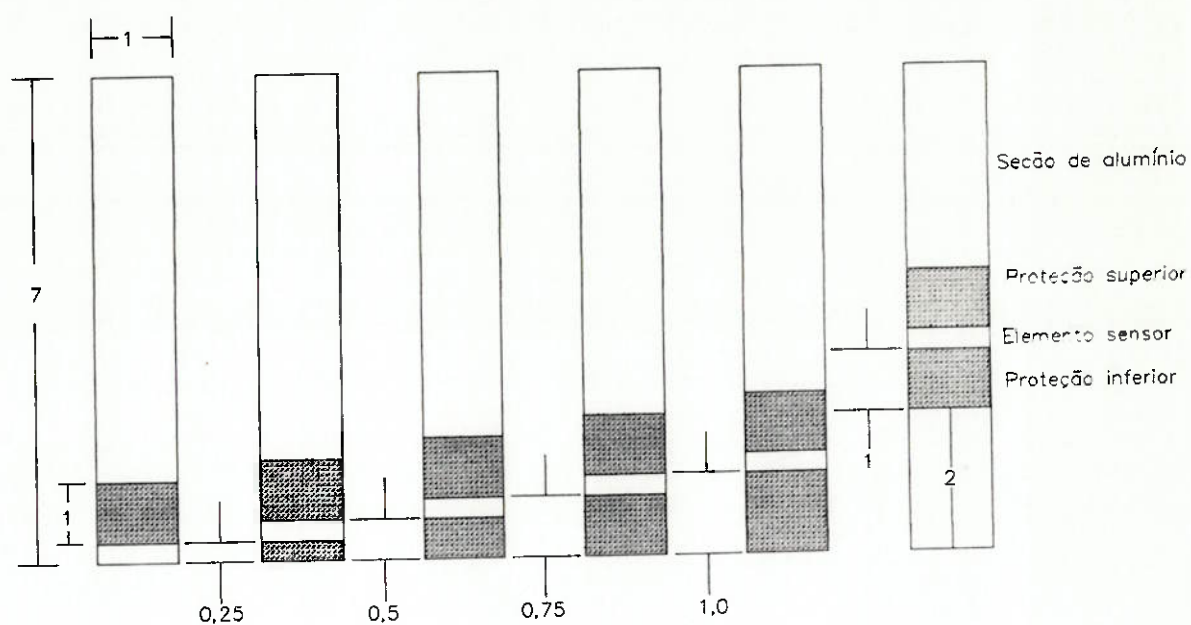
Experimento

Para obter o coeficiente local de transferência de calor com alta acuracidade e alto grau de resolução, é vantajoso aplicar a técnica de sublimação de naftaleno, ao invés da medição direta de transferência de calor. Os resultados adimensionais de transferência de massa, como o número de Sherwood, obtidos pela técnica do naftaleno, podem ser transformados no número de Nusselt para transferência de calor via analogia entre os dois processos. Em adição à melhor precisão na medida, as especiais vantagens da técnica do naftaleno para o presente problema são a ausência de perdas externas, tais como condução no correspondente problema de transferência de calor, e a fácil obtenção das condições de contorno padrão (análogas às temperaturas de parede uniforme). A ausência de perdas por condução significa que um elemento sensível de cobertura do naftaleno deva ser usado apenas para assegurar um desenvolvimento apropriado da transferência convectiva. No correspondente processo de troca de calor, protetores devem ser empregados (geralmente, apenas com parcial sucesso) para minimizar condução e para estabelecer as vizinhanças de convecção adequadas.

Aparato experimental

Um total de seis cilindros foi empregado durante o curso do experimento com o intuito de obter a resolução desejada da variação axial do coeficiente de transferência de massa. Durante cada tomada de dados, apenas um cilindro foi empregado.

Um esquema mostrando um conjunto dos cilindros de testes aparece na figura abaixo:



Cilindros utilizados no experimento

Figura 1.

Quando posicionados para tomada de dados, a extremidade inferior de cada cilindro permanece fixada à parede do túnel de vento, enquanto a superior continua livre.

Como visto na figura acima, cada cilindro é formado por diversas partes: Elemento sensor, proteções superior e inferior, e uma seção metálica (alumínio) que compreende o restante de cada cilindro. O elemento sensor e as proteções expõem a superfície coberta de naftaleno ao fluxo de ar, enquanto que a seção metálica não participa do processo de transferência de massa. O comprimento da seção metálica foi determinado com o intuito de manter igual o comprimento de todos os cilindros (sete diâmetros).

Observando-se atentamente a figura anterior, verifica-se a seqüência de posicionamento do elemento sensor. Começando pelo lado esquerdo da figura, no primeiro cilindro, o elemento sensor encontra-se ao nível do chão. Nos demais, vê-se que sua posição vai crescendo em distância com relação à interface parede-cilindro. O comprimento axial do elemento sensor é igual a um quarto do diâmetro do cilindro. Além disto, sua posição com relação à interface parede-cilindro foi incrementada de um quarto de diâmetro a cada cilindro, incluindo o quinto cilindro do conjunto. Os restantes, para os quais a faixa total de extensão do sensor ultrapassa um diâmetro e um quarto desde a interface, foram utilizados para obter dados de transferência de massa na região de parede afetada.

É relevante discutir a importância das seções de proteção. Para modelar precisamente um cilindro com temperatura uniforme para a analogia entre transferência de calor e massa, toda a superfície do cilindro deveria ser preenchida por naftaleno. Entretanto, na realidade, interações convectivas de transferência de massa (ou calor) entre regiões separadas axialmente apenas ocorrem entre regiões pouco distantes. Também na região de parede afetada no presente experimento, interações axiais estendem-se por mais de um diâmetro de

comprimento. Portanto, as proteções foram necessárias apenas para circundar a seção do elemento sensor coberto por naftaleno, que possuía comprimento suficiente para transpor a região de interações axiais. O motivo de não se moldar todo o cilindro em naftaleno foi reduzir tempo e complexidade de preparo do aparato para cada tomada de dados.

É essencial o perfeito alinhamento das seções, pois o cilindro composto deve possuir uma superfície perfeitamente contínua. Para assegurar a qualidade e repetibilidade do alinhamento, as seções que pertencem a um cilindro nunca podem ser inter-cambiadas com outros cilindros. As seções individuais de cada cilindro possuem tolerâncias rígidas ($< 0,00254$ cm).

O diâmetro nominal de cada cilindro foi de 2,54 cm, sendo que nenhum deles desviou-se deste valor mais do que 0,3%.

Elemento sensor e região de proteção

Um corte transversal de um elemento sensor pode ser visto abaixo:

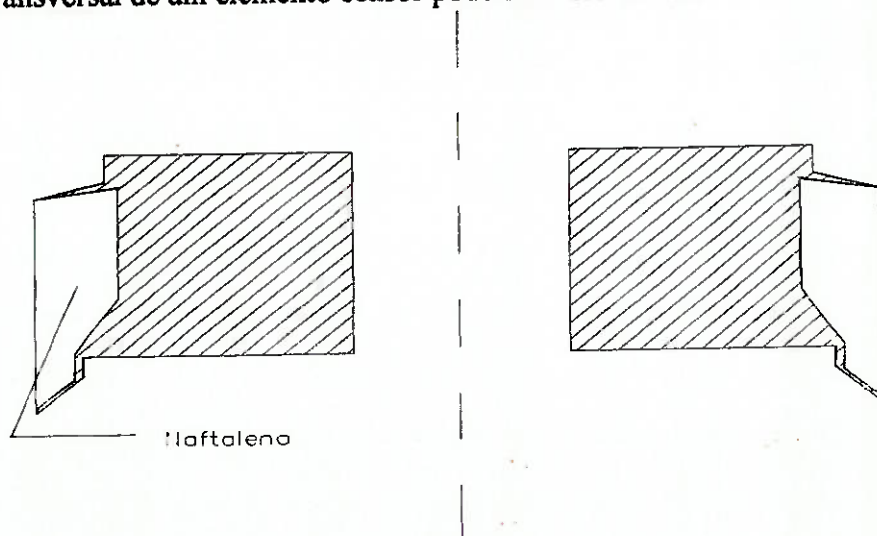


Figura 2.

Como visto, o elemento é, em essência, um disco anular cuja periferia é dotada de uma cavidade dentro da qual o naftaleno é colocado por um processo de fundição. A camada de naftaleno é confinada, em cima e em baixo por finos aros metálicos cujas áreas de exposição são de, aproximadamente, 0,01 cm de espessura. Os aros servem para prevenir possível abrasão do naftaleno o que poderia ocorrer na ausência destes, devido ao contato com as seções de proteção. Além disto, os aros conferem maior resistência mecânica e melhor precisão ao alinhamento das seções quando do cilindro montado.

A figura 2 também mostra que a parede interna do aro superior é chanfrada (para cima), distante da borda exposta, sob um grande ângulo. Esta característica foi proporcionada para assegurar que nenhuma bolha formada durante o processo de fundição pudesse migrar para a superfície exposta do naftaleno. Também o aro inferior foi posto em ângulo de tal forma que encontrasse o chanfro da superfície superior da seção de proteção.

Os discretos degraus nas faces superior e inferior do elemento encaixam-se em degraus similares nas seções de proteção, provendo assim, uma união tipo macho-fêmea. O furo de 0,635 cm de diâmetro ao longo do eixo do elemento foi feito para acomodar uma vareta central que serve para manter fixo o conjunto do cilindro.

A seção de proteção superior tem seu projeto muito semelhante ao do elemento sensor. No entanto, seu comprimento é de um diâmetro, ao invés de um quarto, como o do elemento. Também a seção de proteção inferior é semelhante ao elemento sensor, com relação ao projeto. Porém, neste caso, como pode-se ver na figura 1, seu comprimento varia de um quarto a um diâmetro. Devido ao fato de apoiar-se sobre uma superfície nivelada (a parede do túnel de vento), a proteção inferior não possui degraus como as outras seções. Sua base,

entretanto, é chanfrada, assim, o contato com o túnel de vento se dá apenas ao longo do aro, desta forma, auxiliando no isolamento térmico do cilindro com o túnel de vento.

As várias seções do cilindro são mantidas juntas por meio de uma vareta central cuja extremidade superior é entremeada na seção de alumínio que forma a parte de cima do cilindro. A parte inferior da vareta passa através da parede do túnel de vento e é fixada por uma porca de retenção.

A atenção agora, será voltada para o processo de fundição utilizado para a implantação do naftaleno nos elementos sensores e protetores. Foi empregado um processo idêntico para todos os elementos e seções de proteção. Assim, é necessário apenas que se considere um pedaço representativo, como por exemplo, um elemento sensor. O primeiro passo do processo foi remover o naftaleno remanescente de uma tomada de medidas anterior, através de fusão e evaporação. Então, uma bucha de bronze foi deslizada através do sensor, até que as bordas do mesmo entrassem em contato com a superfície interna da bucha. Esta serviu como contorno externo da nova cavidade do molde. Naftaleno fundido foi então despejado na cavidade, através de um pequeno furo na face superior do sensor. Esta operação de despejo foi facilitada por meio de um funil adaptado ao furo. O ar deslocado da cavidade escapou através de um segundo furo, idêntico ao primeiro, também equipado com funil.

Uma vez que o naftaleno tenha-se solidificado, o sensor pode ser separado da bucha, por meio de leve pressão com os dedos, aplicada na região inferior. A separação torna-se de fácil realização, visto que a superfície interna da bucha foi, previamente, espelhada. O acabamento da superfície exposta do naftaleno adquire comparável qualidade.

A mesma bucha deve ser utilizada para a fundição de todas as seções, com o intuito de assegurar que todas tenham o mesmo diâmetro externo. Quando todas as superfícies de naftaleno para uma particular montagem de cilindro tenham sido fundidas, elas devem ser empilhadas, e cobertas por uma bucha de bronze que deslize sobre a pilha para prevenir uma sublimação antecipada. Para cada conjunto de sensores e seções de proteção, deve haver uma bucha de cobertura específica, cujo comprimento seja precisamente igual à altura da pilha. Deve-se fazer uso de fita adesiva impermeável para selar a pilha, tanto na extremidade inferior, quanto superior.

Instrumentação, organização experimental e procedimento

Cada sensor estava equipado com um termopar permanentemente instalado de cromel-constantan (revestido por Teflon, com fio de 0,025 cm). O termopar foi embebido em naftaleno, com suas junções posicionadas, aproximadamente, a 0,02 cm da superfície exposta ao fluxo de ar. Cada um dos termopares foi calibrado após instalação em seu respectivo sensor. Na montagem experimental, o fio-guia do termopar foi conduzido através do furo central do cilindro e posto par fora pela parte inferior do túnel de vento. Este arranjo evita qualquer tipo de distúrbio que o fio pudesse causar ao fluxo. A força eletro-motriz dos termopares pode ser lida com milivoltímetro digital.

O experimento realizou-se num túnel de vento de baixa turbulência (0,3 - 0,4%), operando em circuito aberto. A seção de teste do túnel era retangular, 30,5 X 61 cm, vertical X horizontal. O cilindro estava orientado verticalmente, e posicionado no meio do caminho entre as paredes do túnel. Como já citado anteriormente, o cilindro estava fixado ao chão do túnel, e havia um vão de 12,7 cm entre a extremidade livre (isto é, extremidade superior) e a parede de cima do túnel.

O cilindro estava situado 91 cm a jusante da entrada da seção de testes do túnel. Para garantir a existência de uma camada limite turbulenta bem desenvolvida, um arame obstrutor (0,157 cm de diâmetro) foi instalado na borda de entrada da seção de testes. Na velocidade mais baixa do experimento (com número de Reynolds ~ 3.500), a espessura da camada limite na região do cilindro era de, aproximadamente, 3,2 cm.

Dados eram coletados ao longo de uma faixa de velocidades de corrente livre do túnel de vento u_{∞} de 2,2 a 14,7 m/s, com uma faixa correspondente de número de Reynolds do cilindro de 3.500 a 23.000. A velocidade de corrente livre foi medida com um tubo de impacto circular de 0,076 cm de diâmetro, situado à frente e acima do cilindro, com uma lâmina adjacente, usada para a pressão estática.

O mesmo tubo de impacto foi empregado para determinar o perfil de velocidades da camada limite adjacente ao chão do túnel de vento na região desocupada do cilindro de testes. Com este fim, um bastão apropriado foi introduzida no escoamento, através de um pequeno furo localizado no chão do túnel (o mesmo furo anteriormente usado para pela vareta central do cilindro).

A diferença entre as pressões de impacto e estática foram medidas por um medidor de pressão com capacidade para diferenciar 10^{-3} Torr. O mesmo instrumento foi usado para determinar a pressão estática do túnel (relativa ao ambiente), enquanto um preciso barômetro providenciava a pressão ambiente.

Cada tomada de dados foi iniciada com componentes dotados de superfícies de naftaleno recém fundidas. Antes de sua instalação no túnel de vento, o elemento sensor foi pesado, utilizando-se uma balança eletrônica analítica ultra-precisa (tipo Sartorius) com a menor

escala lendo 10^{-5} g. Então, o cilindro de testes foi montado, e a bucha foi escorregada através da cobertura de naftaleno e isolado com fita nas extremidades. As fitas serviram para prevenir a sublimação. O cilindro foi, então, colocado no túnel que já estava regulado para a velocidade de corrente livre desejada.

A cobertura do cilindro foi deixada para que se alcançasse equilíbrio térmico com o fluxo de ar, com testemunho das leituras dos termopares embebidos no elemento sensor. Uma vez que o equilíbrio tenha sido atingido, a cobertura pode ser retirada, e as tomadas de dados, iniciadas. A duração de cada tomada foi determinada de acordo com o limite de sublimação, chegando-se a uma variação de diâmetro de menos de 0,0025 cm. Ao encerrar a tomada, a cobertura é novamente posta sobre o sensor e as seções de proteção. Depois da remoção do cilindro de dentro do túnel de vento e de sua desmontagem, o sensor foi pesado (sem a cobertura). A quantidade de massa transferida foi determinada pela diferença de pesos, antes e depois da tomada de dados.

Visualização do fluxo

A técnica do óleo e negro de fumo foi empregada para possibilitar a visualização do padrão de fluxo de fluido adjacente à porção inferior do cilindro e também dos arredores do mesmo, na região do túnel de vento. O procedimento mais comum para se aplicar esta técnica é pincelar uma mistura de óleo e negro de fumo em pó sobre uma superfície e expô-la ao fluxo de ar cujas características devem ser estudadas. Sob ação de tensões exercidas pelo fluido, a mistura mover-se-á ao longo da superfície, produzindo um padrão listado indicando os caminhos das partículas de fluido que passam adjacentes à superfície. Entretanto, em regiões de baixa velocidade, as tensões são tão pequenas que a mistura permanece,

virtualmente, estacionária. O resultado mostrado por estas regiões parece somente preto, sem marcas de listas na superfície.

A visualização do escoamento foi feita separadamente das tomadas de dados para transferência de massa. Neste caso, a superfície foi coberta por papel contact, plastificante, branco, com o intuito de dar o melhor contraste possível com as linhas negras riscadas pelo fluido.

Visando obter o padrão mais definido possível, a visualização final do escoamento foi feita sob a máxima velocidade do túnel de vento, que corresponde a um número de Reynolds no cilindro de 32.000. Uma vez que o padrão formou-se, o papel contact pode ser removido e, então, fotografado.

Resultados do escoamento do fluido

Visualização do fluido

Os resultados obtidos pela visualização do escoamento podem ser vistos nas figuras 3, 4 e 5.

A figura 3 mostra o padrão do escoamento na região adjacente dianteira da superfície do cilindro. A borda superior da figura 3 corresponde a uma posição a, aproximadamente, 2,2 diâmetros da base do cilindro (isto é, acima da base do túnel de vento). Uma inspeção da figura indica que há uma região de interação parede-cilindro que se estende desde a base até, mais ou menos, 0,8 diâmetros acima da base. Além desta faixa, o escoamento não é afetado pela presença da parede, o que pode ser comprovado pela uniformidade do padrão, com o aumento da distância.

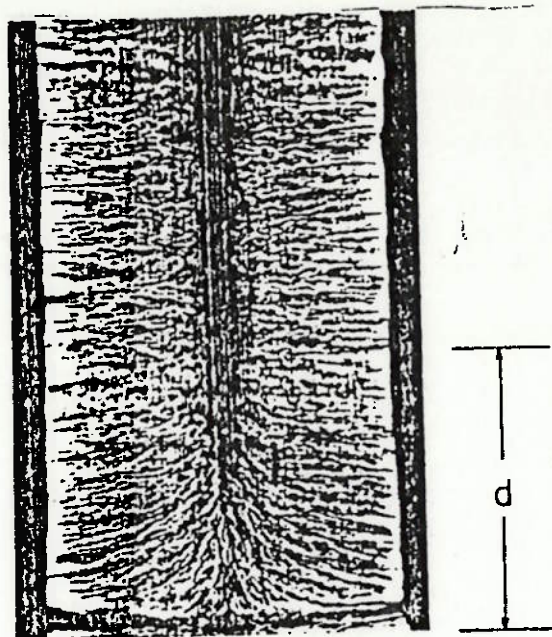


Figura 3.

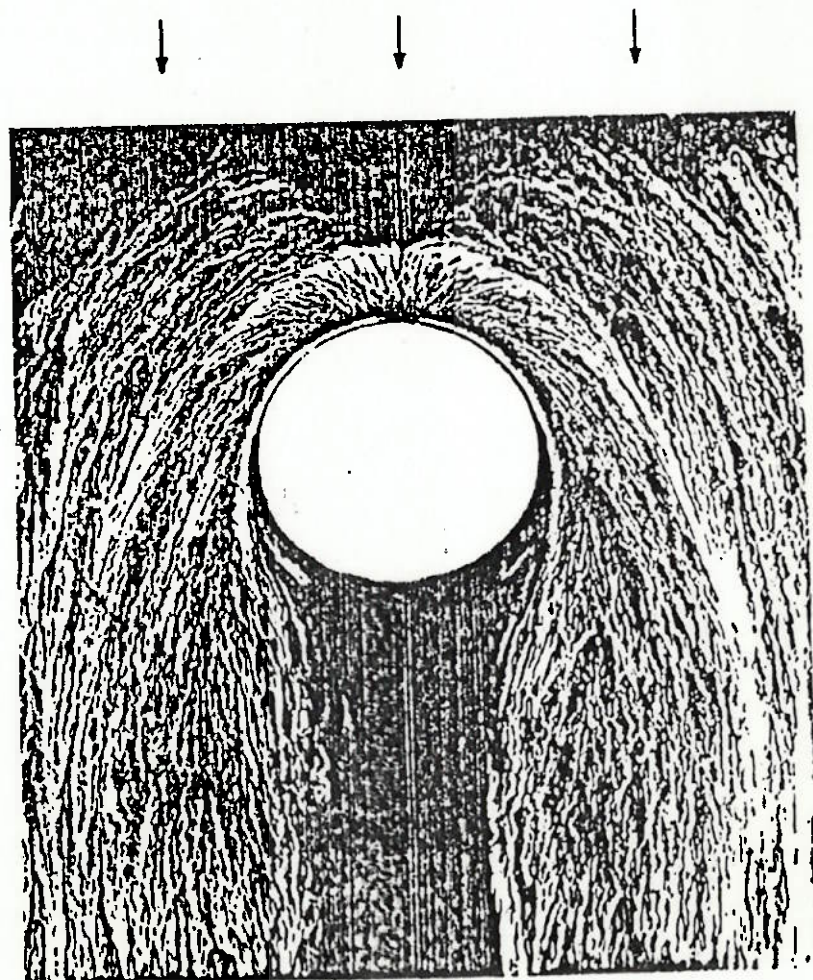


Figura 4.

Na região de parede não afetada, há uma linha de estagnação vertical onde o escoamento de colisão bate frontalmente com o cilindro. A região de estagnação é caracterizada por baixas velocidades, assim, a mistura de óleo e negro de fumo não se move. O escoamento separa-se na linha de estagnação e flui circunferencialmente em torno de cada lado do cilindro, como indicado pelas listas horizontais. Em ambas as bordas da fotografia, há faixas verticais negras, sem listas. A região de dentro destas faixas marca a separação do escoamento do cilindro. Além deste ponto, as velocidades adjacentes ao cilindro são muito baixas para produzir listas.

Na região de interação do cilindro com a parede, a linha de estagnação dá lugar a um escoamento verticalmente para baixo, que também é superposto por escoamento circunferencial, que flui em torno do cilindro. Para melhores esclarecimentos, a figura 5 foi preparada para mostrar o padrão do escoamento adjacente à parede da linha de estagnação do cilindro.

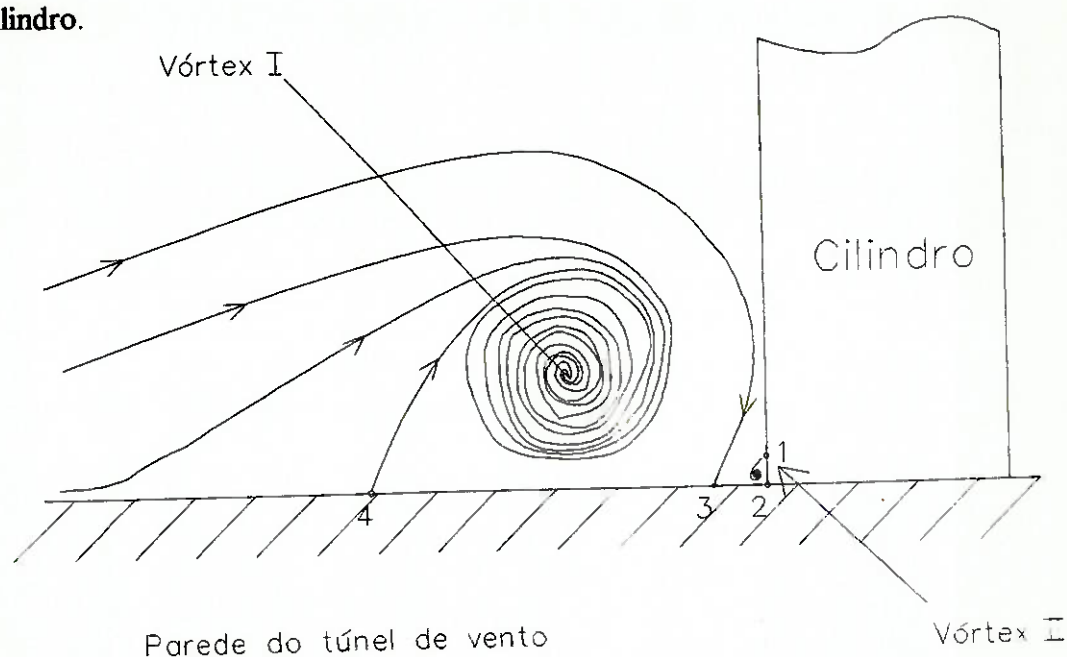


Figura 5.

A figura mostra o padrão do fluido adjacente à parede acima da linha de estagnação do cilindro. Como mostrado na vista lateral, hipoteticamente, há dois vórtices, cujos núcleos estão legendados por I e II. O maior vórtex, de número I, gira em sentido horário, e induz um escoamento para baixo, cujos efeitos são mostrados na figura 3, pelo desaparecimento da linha de estagnação vertical e pelo ângulo de inclinação das listas. O vórtex II é muito menor que o I e gira em sentido anti-horário. Por simples visualização, observou-se um rápido desenvolvimento do padrão do óleo e negro de fumo nas vizinhanças do vórtex II, podendo-se supor que este vórtex gira muito mais rápido que o vórtex I.

Na figura 5, há também, pontos pretos numerados de 1 a 4, que indicam zonas de baixas velocidades que podem ser identificadas nas figuras 3 e 4. Em particular, o ponto 1, situado diretamente acima do vórtex II, aparece na figura 3 como a faixa preta saliente bem sobre a base do cilindro.

A figura 4 mostra o padrão do escoamento adjacente ao fundo do túnel de vento. A área circular branca é o lugar do cilindro, e a direção do escoamento livre é indicada pelas setas. A observação da figura revela um padrão em forma de ferradura, com sua abertura voltada para baixo. Na realidade, há duas estruturas em forma de ferraduras, que correspondem, respectivamente, aos dois vórtices (I e II). Para identificar estas e outras características do escoamento, é conveniente que se imagine uma passagem começando pela extremidade mais distante do cilindro, movendo-se corrente acima no fluido.

A primeira característica encontrada nesta travessia é uma linha preta muito fina, imediatamente adjacente ao cilindro. Isto corresponde ao bolsão de baixa velocidade identificado pelo ponto preto, na figura 5. A próxima característica é uma zona branca. Geralmente, uma estreita região branca indica, como esta, vigorosa movimentação de fluido.

Aqui, especificamente, indica a presença do vórtex II. Continuando a inspeção, revela-se algo como uma faixa negra, mais larga. É uma região de baixa velocidade, situada entre os dois vórtices, como indica o ponto 3, na figura 5. Adiante desta região, há uma zona maior preenchida por listas bem definidas. Na região adiante do cilindro, estas listas representam um refluxo, em concordância com a direção de rotação do vórtex I. A extremidade dianteira desta zona corresponde à extremidade dianteira do vórtex, assinalada pelo ponto 4 (fig.5).

Essas regiões movem-se ao redor das laterais do cilindro e suas igualdades (separadas) persistem até o bordo de fuga do cilindro, e adiante, no caso do grande vórtex em forma de ferradura. Deve-se notar, entretanto, que a parte interna da região negra alarga-se e muda sua natureza, adiante do ponto de separação. Neste ponto, ela começa a alargar e funde-se com a perturbação atrás do cilindro (representada pela larga região negra a jusante do cilindro).

Alguns outros aspectos da visualização do fluido serão revistos quando da análise dos resultados de transferência de massa.

Perfis de velocidades

Perfis de velocidades na direção do fluxo adjacente ao fundo do túnel de vento foram medidos para determinar a extensão da camada limite para a faixa de número de Reynolds considerada. Como visto anteriormente, as medidas foram feitas no local do cilindro, mas com o mesmo retirado.

Tomando-se os valores 4.000, 9.700, 23.000 como números de Reynolds e obtendo-se curvas com a razão u/u_{∞} e y/d (y : altura; d : diâmetro do cilindro), verifica-se que as três

descrevem curvas semelhantes. Saem da origem e curvam-se quando y/d aproxima-se da unidade. Uma das diferenças significativas entre os perfis é a rapidez com que cada um curva-se depois de sair da origem. A inclinação tende a ser mais gradual, a medida que o número de Reynolds diminui. Correspondentemente, o ponto onde $u/u_{\infty} = 0,98$ varia de $y/d \cong 0,8$ para o mais alto número de Reynolds até $y/d \cong 1,3$ para o mais baixo número de Reynolds. Estes valores de y/d podem ser tomados como a própria espessura da camada limite. É importante notar que a espessura da camada limite antes mencionada é, aproximadamente, igual à altura da região de parede afetada, identificada na visualização do escoamento (figura 3).

É possível verificar, também, que no ponto $y/d = 1,25$, todos os perfis excedem o valor $u/u_{\infty} = 0,975$. Desta forma, $y/d = 1,25$ foi a maior altura na qual transferência de massa foi medida, na região de parede adjacente ao cilindro.

Resultados da Transferência de Massa

Conversão de dados

Como mencionado anteriormente, a quantidade de massa transferida da superfície do elemento sensor foi determinada pela medição de massa do elemento, antes e depois de cada tomada de dados. O fluxo de massa \dot{m} foi então obtido dividindo-se a massa transferida pela superfície do naftaleno pela duração do experimento. A partir disto, o coeficiente de transferência de massa K e o número de Sherwood Sh foram obtidos por meio de suas definições:

$$K = \frac{m}{(\rho_n - \rho_{n\infty})}$$

$$Sh = \frac{K*d}{D}$$

A densidade de vapor ρ_n do naftaleno na superfície de sublimação foi calculada pela relação de pressão de vapor de Sogin e pela lei dos gases perfeitos, usando as medidas de temperatura do elemento sensor como entrada. No experimento, a corrente livre era ar puro. Desta forma, $\rho_{n\infty} = 0$. O coeficiente de difusão que aparece na primeira equação, foi eliminado pela aplicação da definição do número de Schmidt: $Sc = \frac{\nu}{D}$. Assim, o número de Sherwood pode ser escrito como: $Sh = \frac{(K*d)}{\nu} * Sc$, onde $Sc = 2,5$.

A diferença de pressão estática de impacto relaciona-se com a velocidade de fluxo livre u_∞ , com a qual o número de Reynolds pode ser definido da maneira padrão:

$$Re = \frac{u_\infty * d}{\nu}$$

Número de Sherwood

O primeiro passo é a apresentação dos resultados do número de Sherwood para a região de parede não afetada e sua comparação com as informações sobre transferência de calor da literatura. Estes dados foram coletados com o elemento sensor posicionado na faixa $3 \leq y/d \leq 3,25$, e o número de Sherwood correspondente foi plotado como função do número de Reynolds na figura 6a.

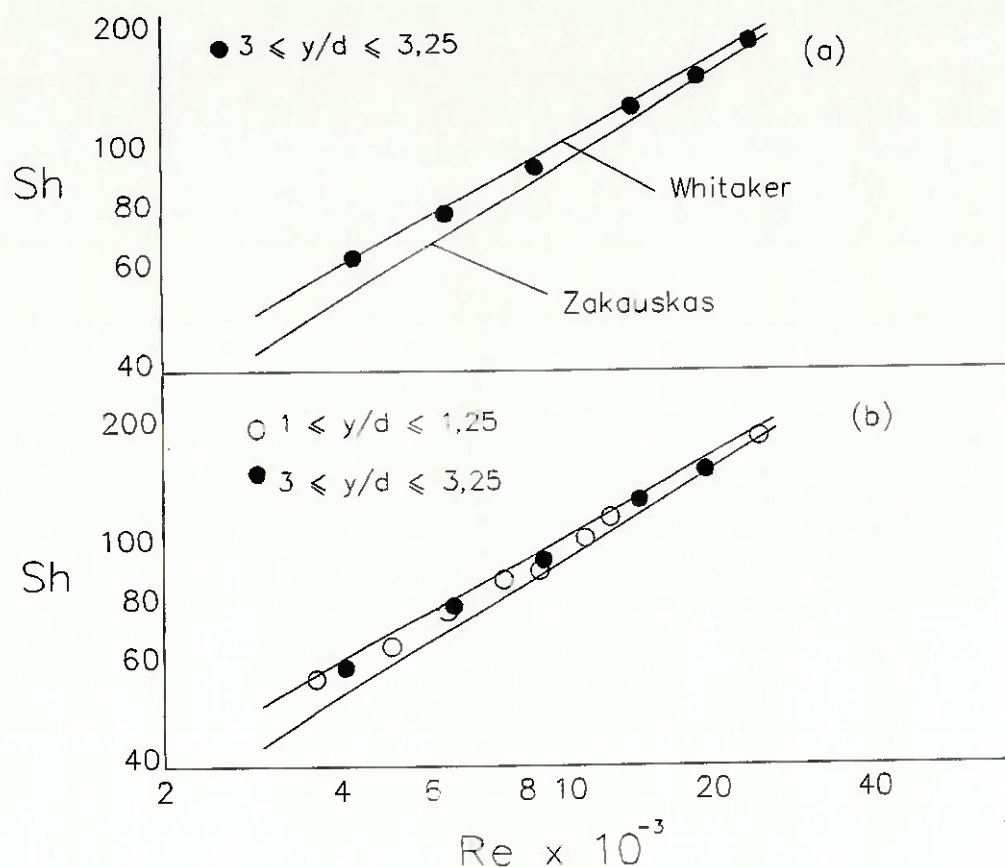


Figura 6.

Estão mostradas, também, duas linhas representando, respectivamente, correlações de Zakauskas e Whitaker para transferência de calor em cilindros em escoamento cruzado. Quando estas correlações são utilizadas para transformações de transferência de calor para transferência de massa, alguns termos são substituídos, como os números de Nusselt e Prandtl por Sherwood e Schmidt, como mostrado abaixo:

$$Sh = 0,26 * Re^{0,6} * Sc^{0,37}$$

$$Sh = (0,4 * Re^{1/2} + 0,06 * Re^{2/3}) * Sc^{0,4}$$

As correlações acima mencionadas foram escolhidas entre várias outras utilizadas para cilindros em corrente cruzada, porque são as únicas baseadas em dados para fluidos com diversos números de Prandtl (assumindo número de Schmidt igual a 2,5, do presente experimento). Os outros experimentos são baseados nos dados do ar ($Pr = 0,7$), com fator $Pr^{1/3}$. Em geral, fazendo-se uma revisão de todas as correlações disponíveis, verifica-se que a extensão na qual elas diferem é notável. Por esta razão, em todos os casos, há uma considerável dispersão de dados em torno das linhas de correlação.

Olhando agora para a figura 6, vê-se que os dados presentes encontram-se entre duas linhas de correlações, tendendo a favor da correlação de Whitaker, para números de Reynolds baixos.

De acordo com o demonstrado, verifica-se que os dados obtidos condizem com os da literatura de maneira adequada. Este grau de acuidade fornece confiança à técnica de sublimação do naftaleno e seu modo de aplicação aos experimentos presentes.

Outro ponto importante são os resultados do número de Sherwood para a região de parede adjacente. Tomando-se gráficos semelhantes aos da figura 6, para cada quarto de comprimento do cilindro ($1 \leq y/d \leq 1,25$; $0,75 \leq y/d \leq 1$; ... ; $0 \leq y/d \leq 0,25$), verifica-se que todos eles possuem formato semelhante.

Os dados para um número de Sherwood para uma específica faixa de interesse y/d são mostrados com círculos vazados, enquanto que os círculos preenchidos (pretos) correspondem aos números de Sherwood para a região de parede não afetada. As linhas mostradas são as correlações de Zakauskas e Whitaker. Os círculos pretos e as retas servem

como referências que serão usadas para identificar as mudanças no número de Sherwood que ocorrem à medida que a interface parede-cilindro se aproxima.

Os resultados para a região $1 \leq y/d \leq 1,25$ são mostradas na figura 6b, onde pode-se ver que eles são virtualmente idênticos àqueles para a região não afetada. Outras figuras, de maneira semelhante, podem ser executadas para as demais regiões. No geral, há uma tendência para efeitos mais fortes nas paredes, em regiões de números de Reynolds mais baixos.

O aumento da importância dos efeitos de interação parede-cilindro com a diminuição de y/d é completamente esperado, tanto intuitivamente como com base nas informações do escoamento do fluido, mostrado pela figura 3. Entretanto, isto relembra a racionalização na direção decrescente do número de Sherwood com a redução da fração y/d na maior parte da região afetada e a inversão desta direção na região sensível mais baixa.

Para explicar o decréscimo, deve-se falar novamente que finas espessuras de camada limite correspondem a baixas taxas de transferência. Em oposição, a espessura da camada limite é incrementada por baixas velocidades e por longos comprimentos de escoamento ao longo da superfície. Na região de parede afetada, as velocidades são mais baixas do que aquelas em regiões mais distantes da parede. Assim, considerando as listas curvadas na parte inferior da figura 3, fica evidente que o caminho percorrido pelas partículas do escoamento na região de parede afetada é mais longo do que aquele percorrido pelas partículas que se movem circunferencialmente em torno do cilindro. Desta forma, a velocidade decrescente e o longo caminho percorrido levam à diminuição de transferência de massa na região adjacente de parede afetada.

Com relação à direção reversa na região sensível mais baixa, isto pode ser atribuído à presença do pequeno vórtex (vórtex II da figura 5). Este vórtex é bastante forte, com relação ao restante do escoamento. Além do mais, fica posicionado na base do cilindro, imediatamente adjacente à região sensível mais baixa.

Do ponto de vista prático, a extensão da redução do número de Sherwood na região de parede adjacente é de pequena importância.

Conclusão

Medições de transferência de massa (quase) local foram feitas na região de junção parede-cilindro com o intuito de determinar como os coeficientes são afetados pela interação entre parede e cilindro. Para as medições, foram usados elementos sensores com comprimentos variantes em torno de um quarto de diâmetro do cilindro. Os experimentos foram realizados em uma faixa de número de Reynolds variando de 3.500 a 23.000. Para suplementar o trabalho de transferência de massa, foram realizadas medições de perfis de velocidades do escoamento do fluido e sua posterior visualização. O cilindro era suficientemente longo a fim de evitar que a região adjacente de parede fosse influenciada pelos efeitos hidrodinâmicos e de transferência de massa que estivessem ocorrendo na outra extremidade do mesmo, que estava livre (isto é, não fixada à parede).

As medições de transferência de massa e de perfis de velocidade, além da visualização do escoamento, todas indicaram que as interações parede-cilindro ficaram confinadas a um comprimento de cilindro com extensão de, aproximadamente, um diâmetro a contar da parede.

A interação causou um decréscimo nos coeficientes de transferência, relativamente à região de parede não afetada do cilindro. Estas reduções foram acentuadas com a diminuição da distância da parede, mas esta direção foi invertida na vizinhança imediatamente próxima à parede, devido à presença de um compacto e vigoroso vórtex.

A diminuição dos coeficientes na região de parede relatada foi moderada, com o valor mais acentuado, na faixa de 15%. Para a extensão total afetada, desde a parede até uma distância de um diâmetro de cilindro da mesma, o decréscimo ficou em torno de 9%. Quando estes efeitos não são completamente desprezíveis, também não são grandes o suficiente para invalidar procedimentos de projetos que ignorem reduções induzidas na parede, no cálculo do coeficiente de transferência de calor.

No caso de interações parede-cilindro em feixes de tubos, a situação torna-se complicada devido à interação entre cilindros. Entretanto, devido ao anteriormente visto, é razoável esperar que as camadas limite da parede sejam mais finas do que as obtidas para um cilindro único em escoamento cruzado. Se isto ocorrer, então a região afetada deverá ser menor que um diâmetro do cilindro utilizado no experimento. Caso a maior parte dos diâmetros dos cilindros no feixe possuam comprimento substancialmente maior que um diâmetro, a interação parede-cilindro não terá maiores efeitos sobre a transferência de calor.

Aplicação ao aparato medidor de intensificação em estudo

Com os resultados, verifica-se que a influência da região de interação parede-cilindro fica restrita a uma zona de aproximadamente um diâmetro de cilindro. A diminuição nos coeficientes de troca de calor (e massa) ficou, no geral, em torno de 9 %. Com isto, tendo-

se conhecimento deste fato, é possível realizar o experimento, desprezando-se esta redução no valor, ou corrigindo-o, considerando-se este valor experimental.

No caso do experimento em questão, é necessário que se realize as medições em uma região maior que um diâmetro de cilindro, com o intuito de evitar que se tenha valores muito singulares, fortemente afetados pela interação parede-cilindro. Assim, os resultados obtidos apresentarão melhor precisão.

Modelagem do Naftaleno

O aparato experimental permite três tipos de soluções, por meio de diferentes regiões dotadas de naftaleno para medições de transferência de massa. A primeira delas é recobrir a chapa vertical (aleta) com naftaleno, e então, realizar a medição apenas nesta zona. Outra maneira é moldar o tubo com naftaleno e fazer a leitura de massa sublimada nesta região circunferencial em torno do cilindro. A terceira opção é recobrir ambas as partes, chapa e cilindro e assim, realizar medições mais completas, englobando e avaliando os resultados das duas regiões.

Cada um dos processos de formação da camada de naftaleno será discutida a seguir:

1. Chapa

Ao se pensar em revestir a aleta com naftaleno, é preciso que se faça algumas considerações, previamente:

- A chapa permanecerá na posição vertical durante o experimento, ou seja, é preciso que a camada de naftaleno seja firmemente fixada à chapa;
- Ao se fazer uma placa de naftaleno em molde externo ao conjunto é preciso pensar na necessidade de transporte e na sua fixação na aleta, levando-se em conta aspectos como sublimação indesejada, (antecipadamente ao experimento) tempo gasto para estas operações, além de material e métodos compatíveis com a fixação;
- Fragilidade da placa e possibilidades de trincas ou quebra durante o transporte.

É verdade que existem outros aspectos relativos ao fato, no entanto, são os listados anteriormente os de maior gravidade para a presente situação.

Tendo em vista tais considerações, a solução mais viável é adotar a própria aleta como molde para a fundição da placa de naftaleno.

Devido às características da mesa tridimensional que fará a leitura da placa, para que se obtenha resultados satisfatórios nesta medição, é conveniente que a espessura a ser sublimada seja da ordem de 100 μm (0,1 mm). Outro fato a ser levado em conta para a decisão desta espessura é o tempo de duração do experimento.

A chapa a ser utilizada é de aço inoxidável devido às suas características, apropriadas à situação.

Deverá ser feito um rebaixo no centro da chapa, com dimensões 300 X 300 mm, com 0,4 a 0,5 mm de espessura. No centro deste, deverá ser usinado um furo com 100 mm de diâmetro. Este diâmetro corresponde ao do cilindro, visando-se assim, um ajuste forçado entre ambos.

Para a realização do rebaixo (figura 1), são diversas as possibilidades: pode-se utilizar uma fresadora ou mesmo uma retífica. A dificuldade com estes equipamentos se dá devido à pequena espessura, tanto da chapa como do rebaixo. Uma outra alternativa, bastante viável é utilizar-se duas chapas com 0,5 mm de espessura sendo uma delas recortada com as dimensões do rebaixo (300 X 300 mm) no centro, ou mesmo utilizar-se pequenas tiras recortadas de chapa, formando o contorno do rebaixo. Fazer a união entre as duas chapas planas, provavelmente por meio de cola, e então, obter uma placa com as características desejadas.

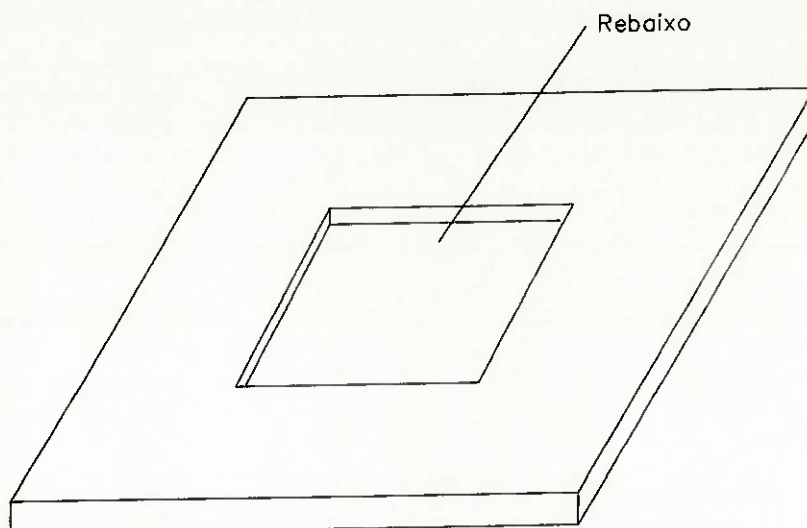


Figura 1.

Outra alternativa é o uso de máquinas com controle numérico, nas quais faz-se um programa especificamente para a situação.

Uma sobre chapa, dividida em duas metades iguais deve ser sobreposta à chapa, encaixando-se no cilindro de maneira bem firme. Previamente, deve ser lubrificada com silicone na região que ficará em contato com o naftaleno, a fim de evitar adesão deste à chapa sobreposta.

Como mostra a figura 2, a chapa deve ser dotada de dois furos ligando a cavidade ao ambiente. Por meio de um deles, no qual é adaptado um funil, despeja-se o naftaleno fundente; o outro tem a função de escape de ar.

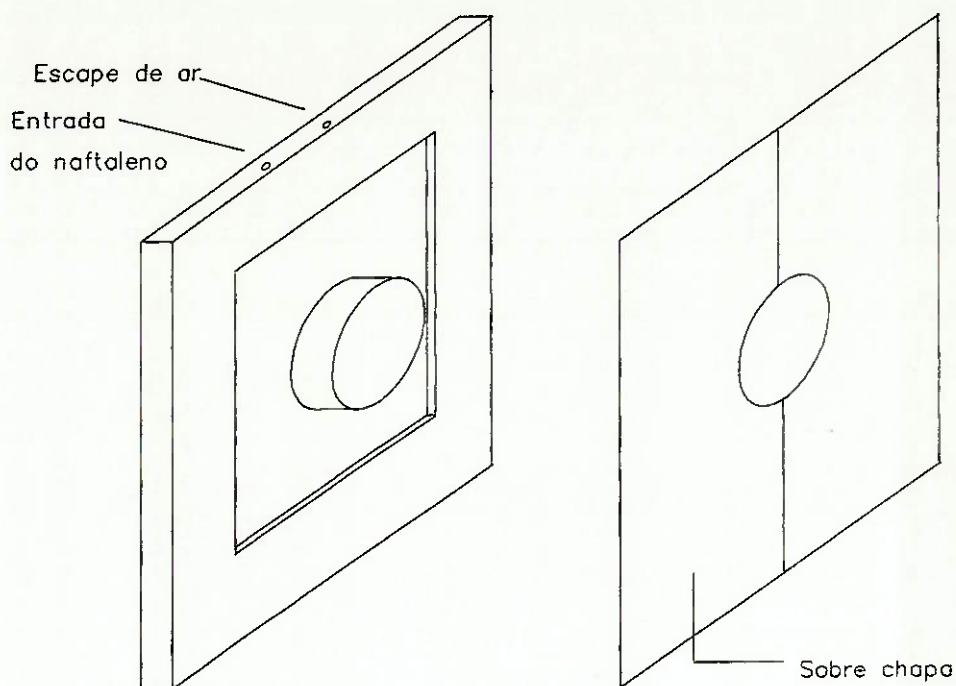


Figura 2.

É preciso que se preste atenção ao processo de resfriamento do naftaleno durante sua solidificação, fazendo com que esta ocorra de forma homogênea e evitando que se formem bolhas de ar na camada. (*)

Depois da solidificação e do completo resfriamento da camada, a sobre chapa pode ser retirada. É conveniente que isto seja feito poucos instantes antes de se realizar o experimento, evitando assim, uma sublimação antecipada do naftaleno.

* Maiores detalhes sobre o resfriamento, consultar Apêndice I.

2. Cilindro

O tubo pode ser revestido com naftaleno, tomando-se como molde um outro tubo com diâmetro maior - exatamente a espessura de naftaleno que se deseja - bipartido para facilitar a sua remoção.

Neste caso, o tubo do aparato possui diâmetro de 95,25 mm. Deseja-se que a espessura do naftaleno seja 0,4 ou 0,5 mm. Assim, o tubo externo que funcionará como molde deverá possuir diâmetro interno igual a 95,65 mm ou 95,75 mm, respectivamente. A superfície interna do molde deverá ser recoberta com graxa de silicone para evitar adesão do naftaleno ao molde. A figura 3 mostra um esboço deste molde.

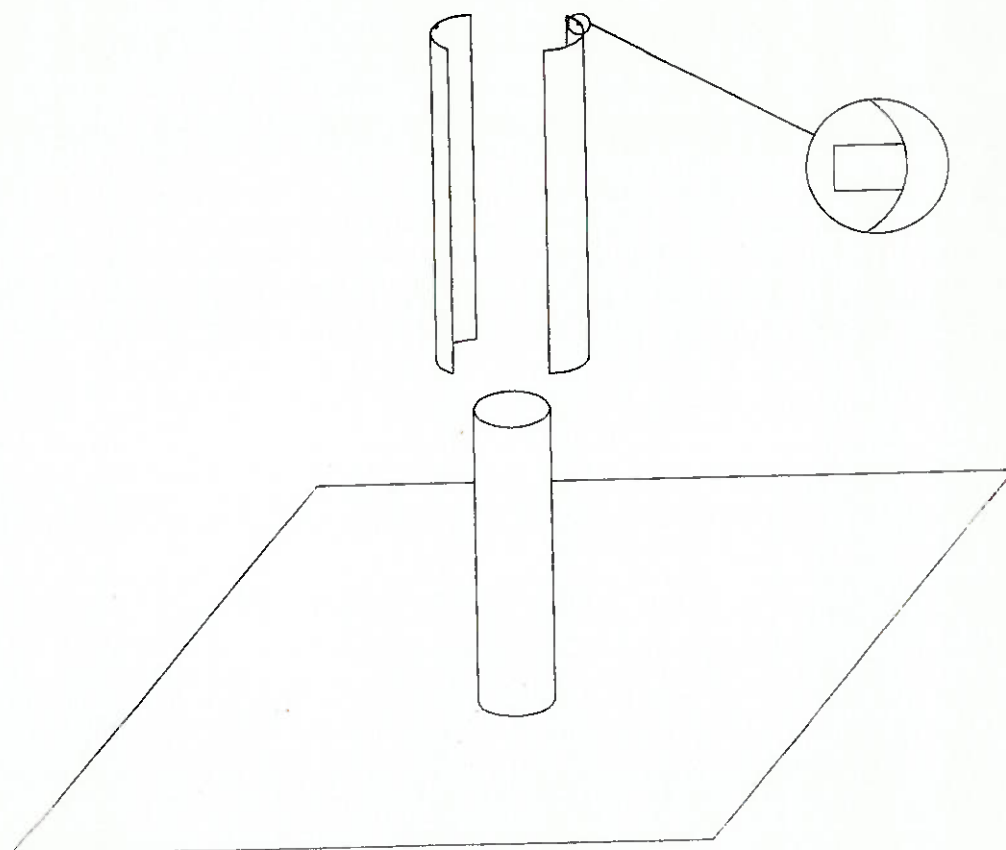


Figura 3.

A emenda das duas metades do molde deve ser feita com encaixe, como no detalhe mostrado na figura 4, com o intuito de evitar derramamento do naftaleno. Para assegurar vedação, as partes podem ser amarradas com uma cinta de borracha, por exemplo.

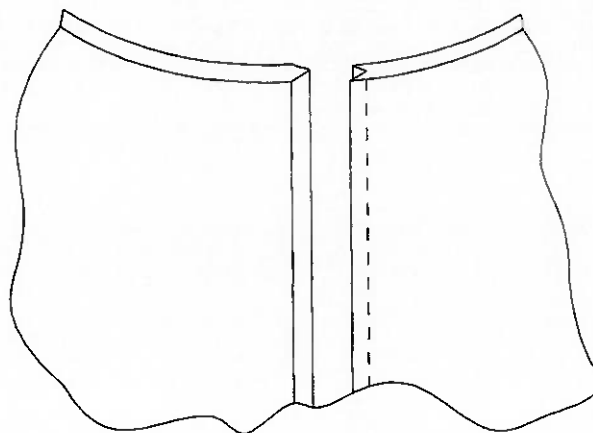


Figura 4.

É sabido que este processo deixará uma nervura no naftaleno, após solidificação, devido à bipartição. No entanto, fazendo-se o encaixe com precisão, a marca deixada poderá ser praticamente anulada através de um breve polimento, posteriormente.

Neste segundo caso, apenas o cilindro é dotado de naftaleno. Assim, a chapa (aleta) não possui cavidade.

Para que se consiga uma perfeita concentricidade entre os tubos, as duas metades do molde devem possuir uma pequena aba na região superior (recortada no próprio molde) com comprimento igual à espessura da camada a ser solidificada (ou seja, a folga entre os cilindros). Este detalhe está ressaltado na figura 3. Para que tal recorte não prejudique o naftaleno solidificado, é aconselhável que o molde seja 0,4 ou 0,5 mm mais longo que o tubo. Desta forma, a aba ficará exatamente em contato com a superfície superior do cilindro.

É importante observar o perfeito encaixe entre a aleta e a região de apoio do molde, a fim de evitar vazamentos.

O naftaleno aquecido é despejado verticalmente, dentro do molde a uma temperatura de, aproximadamente, 100 °C. É necessário aplicar algum tipo de técnica de refrigeração, com o intuito de garantir uma camada bastante homogênea (Ver apêndice I).

Depois de solidificado, retira-se o molde, cuidadosamente, e então, pode-se polir as nervuras deixadas pelas emendas, caso necessário.

3. Placa e cilindro

Neste caso, basta que se faça a junção dos dois procedimentos anteriores, com pequenas adaptações.

A aleta dotada de cavidade, com o cilindro encaixado será utilizada como molde básico. Sobre este conjunto será montado um cilindro bipartido (o mesmo do caso 2) dotado de uma base soldada, perfeitamente paralela à aleta. A figura 5 mostra este sobre-molde.

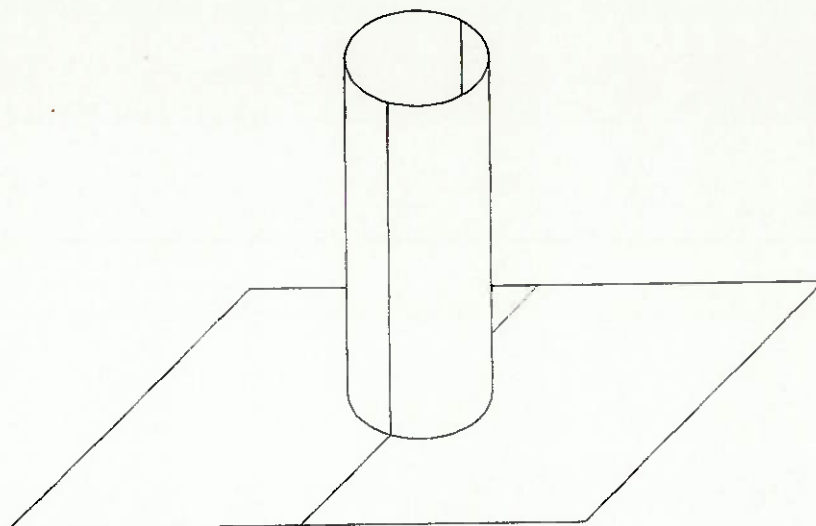


Figura 5.

Esta peça deverá ser montada da mesma maneira como feito no caso 2, assegurando a não existência de espaço livre entre as duas chapas: base do molde e aleta, com exceção da região central, onde há a cavidade de depósito de naftaleno.

Depois de montado o molde sobre a estrutura, o naftaleno fundente a 100 °C deve ser despejado dentro do conjunto, utilizando-se alguma técnica de resfriamento, como citado no apêndice I.

Montagem do Aparato

O aparato experimental deve ser acoplado à seção de testes existente no túnel de vento. Seu esboço e medidas podem ser vistas no capítulo "Viabilidade das técnicas de medição".

No entanto, a região de tomada de medidas ocupa uma área bastante pequena com relação às dimensões da seção. Por este motivo, uma estrutura complementar deve ser adicionada ao conjunto aleta-cilindro, com o intuito de conferir estabilidade e resistência mecânica ao aparato.

A figura 1 mostra, de maneira esquemática, como tal montagem pode ser realizada.

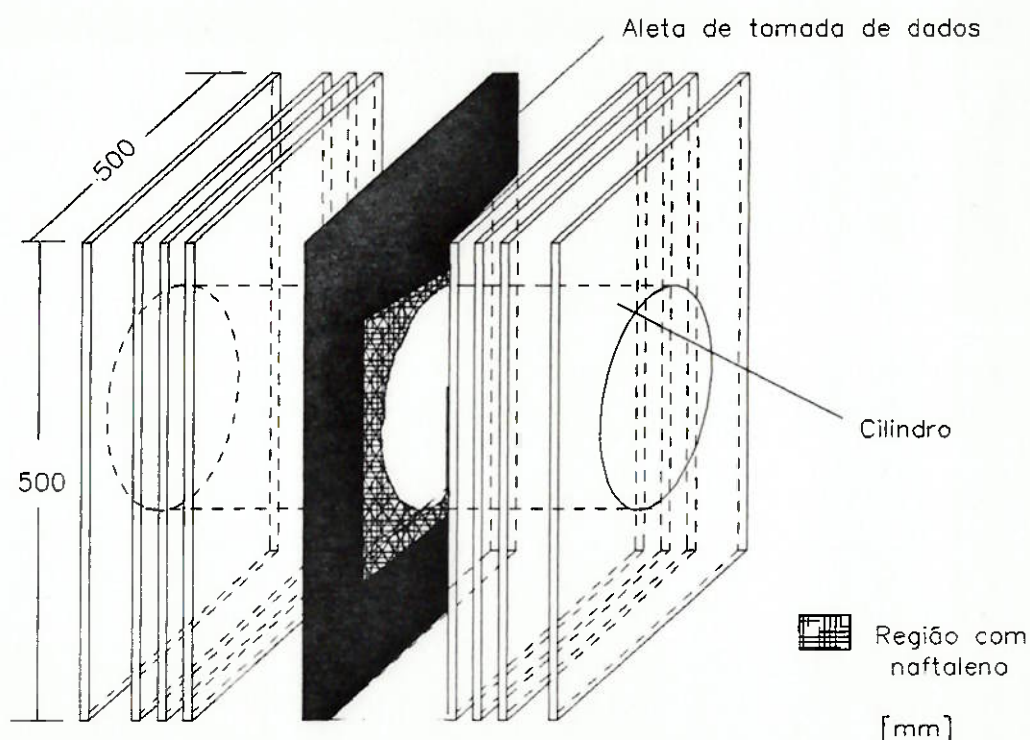


Figura 1.

Dimensões:

- Primeira e última aleta da lateral da seção de testes: 11 mm
- Distância entre aletas: 18 mm
- Número de aletas (incluindo a dotada de naftaleno): 26
- Espessura das aletas da estrutura: 1 mm
- Espessura da aleta com naftaleno: 1,0 mm

A aleta central do aparato será dotada de naftaleno e apenas neste conjunto aleta-cilindro serão realizadas as medições. Esta posição foi determinada devido à influência da camada limite conduzida pelas paredes laterais do túnel de vento nas regiões mais próximas às laterais da seção.

A parte a ser acoplada (dispositivo de tomada de dados) é um conjunto aleta e cilindro. O restante do aparato é composto pelas demais 25 aletas e um tubo.

Com relação ao acoplamento, visando-se uma maior agilidade neste processo, deve-se aumentar ligeiramente o diâmetro do tubo na região de encaixe deste nas aletas anterior e posterior à de testes. Assim, para que o dispositivo de tomada de dados adapte-se ao restante do aparato, basta que o tubo do primeiro seja suavemente pressionado contra os tubos das seções complementares.

Nas seções superior e inferior da seção de testes devem ser colocadas quatro guias com 11 mm de comprimento, que terão a função de apoiar a estrutura. No fundo da seção, é preciso que se coloque, também, um limitador que atuará garantindo que a tomada de dados ocorra sempre na mesma posição, com relação ao túnel de vento.

Medições a serem realizadas no experimento

Para cada disposição de geradores de vórtices ou outros elementos intensificadores de troca de calor, e assim, conseqüentemente, para cada tomada de dados, algumas medições devem ser realizadas.

Velocidade de escoamento de ar:

O uso de tubos de Pitot é bastante eficiente nestas condições. São pequenos tubos de impacto em conjunto com uma barreira estática. Também podem ser utilizados anemômetros de fio quente, pois são bem sensíveis a rápidas flutuações de velocidade. Esta última alternativa apresenta custo elevado, com relação à primeira.

Pressão estática no túnel de vento:

Para esta medição de diferença de pressão estática de impacto utiliza-se um medidor de pressão do tipo Baratron. É um transdutor de pressão com capacidade para discriminar 10^{-3} mmHg. Para a pressão estática a leitura do medidor é suplementada pela medição da pressão barométrica ambiente.

Massa de naftaleno:

A massa de naftaleno deve ser medida antes e depois de cada tomada de dados. A diferença obtida entre estes dois valores dá a quantidade (em peso) de naftaleno sublimado.

Esta medida deve ser bastante precisa. Pode-se utilizar uma balança analítica do tipo Mettler, com a menor divisão de escala em 10^{-4} g (0,1 mg).

Procedimento Experimental

A cada tomada de dados, uma nova superfície de naftaleno deve ser preparada, seja ela a aleta, o cilindro ou ambos. É importante ressaltar que nas tomadas subsequentes à primeira a superfície deve ser limpa cuidadosamente.

Antes da instalação do aparato no túnel de vento, o conjunto aleta - cilindro dotado de naftaleno deve ser pesado. Imediatamente após a pesagem, o conjunto deve ser afixado ao restante do aparato e então, inserido no túnel. O escoamento já deve estar estabilizado.

Tomam-se as medidas necessárias e, após o tempo de experimento calculado anteriormente, o aparato pode ser retirado do túnel. O conjunto aleta-cilindro deve ser coberto, por exemplo, colocado dentro de um envólucro plástico, a fim de se fazer o seu transporte até o local adequado a uma nova pesagem. Depois disto, deve ser levado para a mesa tridimensional onde será realizada a leitura de sublimação.

Com os valores de massa medidos antes e depois de cada tomada de dados, pode-se avaliar a taxa de massa transferida (\dot{m}) por unidade de área de superfície de naftaleno. O coeficiente de transferência de massa h_D é a taxa \dot{m} pela diferença de densidade do vapor de naftaleno na superfície e no escoamento próximo. Esta última densidade é igual a zero, enquanto que a primeira é determinada empregando-se a relação temperatura-pressão de vapor de Sogin, em conjunto com a lei dos gases perfeitos.

Para uma representação adimensional, usa-se o número de Sherwood (Sh) para transferência de massa que pode ser convertido no número de Nusselt para transferência de calor.

$$Sh = \frac{h_D * x}{D}$$

onde: h_D : coeficiente de transferência de massa
 x : dimensão característica
 D : coeficiente de difusão do naftaleno no ar

A parte correspondente ao número de Prandtl em transferência de massa é o número de Schmidt: $Sc = \nu / D$. Neste caso, devido à diminuta concentração de vapor de naftaleno, ν pode ser tomado como a viscosidade cinemática do ar puro.

O último parâmetro adimensional é o número de Reynolds:

$$Re = \frac{V * x}{\nu}$$

onde : V : velocidade do escoamento

Com os dados de projeto, sabe-se que: $Sc = 1,48 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} / 9,55 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 1,55$

A grande maioria das correlações presentes na literatura são aplicáveis para $Sc = 0,7$. Portanto, a mais favorável para este caso que difere do padrão é a correlação de Zakauskas, aplicável para $Sc > 0,7$. Com as devidas simplificações, a correlação torna-se:

$$Nu = 0,26 * Re^{0,6} * Pr^{0,37}$$

(Como mostrado anteriormente, no capítulo: " Estudo de transferência de calor adjacente à extremidade do cilindro em escoamento cruzado ".)

O expoente 0,6 do número de Reynolds e a constante 0,26 são especificadas para uma faixa de Reynolds de 10^3 a $2,5 * 10^5$.

Neste caso: $Re = 10.688 < 3 * 10^5$. O escoamento é laminar .

Com estas correlações apresentadas e os dados obtidos, vários gráficos podem ser plotados, conforme a necessidade; os valores para os coeficientes de transferência de calor podem ser obtidos via analogia demonstrada: o coeficiente global é obtido através dos dados de pesagem e os locais, de acordo com as medições de sublimação demonstradas pela mesa tridimensional.

Colocação dos geradores de vórtices

Ao menos duas tomadas de dados devem ser realizadas. A primeira deve conter exclusivamente o cilindro e a aleta, dotado(s) de superfície de naftaleno. Esta será a medida de referência (padrão) para as demais medições. As tomadas seguintes deverão conter os geradores de vórtices em posições distintas, para então ser possível a análise comparativa dos resultados obtidos.

Os geradores de vórtices, responsáveis pela formação de turbulência no escoamento e, conseqüentemente, alteração (intensificação) na troca de calor podem ser dispostos de qualquer maneira, sobre a superfície de naftaleno ou não. Podem ser confeccionados em diversos tamanhos e alocados em diversas posições, conferindo resultados variados, de acordo com o que se pretenda do experimento.

Mesa de coordenadas tridimensional

A Escola Politécnica tem à disposição uma máquina de medição tridimensional CNC óptica. Esta aparelhagem é bastante adequada para leitura da superfície de naftaleno após as medições, devido às suas satisfatórias confiabilidade e eficiência.

Introdução

Medições de propriedades de superfícies de precisão constituem um problema de difícil solução dentro do controle geométrico. Métodos convencionais praticamente inexistem ou são caracterizados por grande morosidade e falta de informações. A medição de constância de afastamento em blocos padrão é um exemplo clássico, onde além da retroação e desgaste provocado pelo contato mecânico dos apalpadores, o processo normalizado é bastante metódico e só fornece informações em cinco pontos notáveis, com precisão raramente melhor que $0,02 \mu\text{m}$.

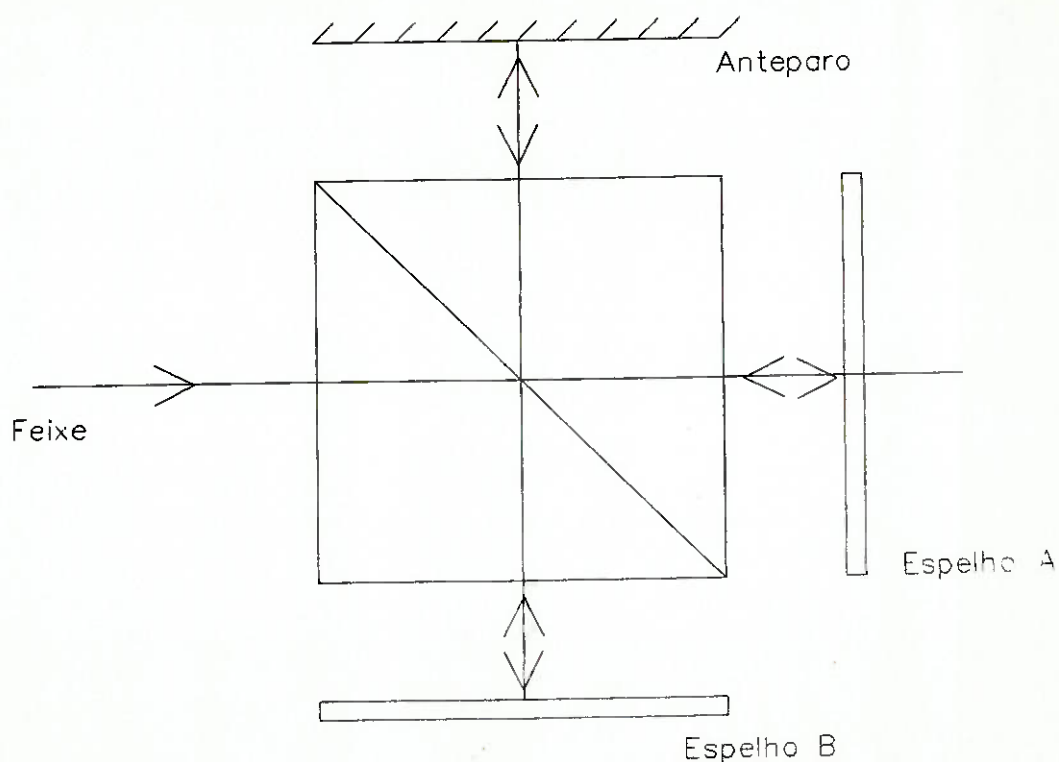
O sistema apresentado a seguir é completamente automático, não convencional e é usado para efetuar o controle geométrico de superfícies planas ou quase planas, com elevada precisão. Dispensa a intervenção do operador e efetua medições absolutamente sem contato ou colagem de superfícies. O sistema também não utiliza componentes ópticos de precisão, mas sim um padrão para compensar os erros sistemáticos provocados pelas aberrações ópticas.

Princípio de funcionamento

O sistema de medição é composto, basicamente, por um interferômetro de Michelson instrumentado, contendo o sistema de medição de fase, de varredura, um sistema computacional e o software.

O interferômetro de Michelson possui amplas aplicações na metrologia. Consiste basicamente de um divisor de feixe e um par de espelhos. O divisor separa o feixe em duas componentes. A primeira segue em frente e é refletida de volta por um espelho, na volta é desviada lateralmente, atingindo um anteparo. A outra componente é desviada para o lado pelo divisor e atinge outro espelho, sendo refletida de volta para a região do anteparo. Assim, no anteparo, incidem, simultaneamente, as duas componentes superpostas, havendo então interferência.

Abaixo, está esquematizado um interferômetro de Michelson básico:



A fonte de luz do sistema é um laser de Hélio-Neônio de 4 mW com $\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$ filtrado e colimado por um sistema óptico conveniente de forma a se obter uma onda plana. Obtém-se assim, uma luz monocromática estável de intensidade suficiente.

A superfície a ser medida deve ser posicionada sobre uma mesa contendo guias apropriadas, equipada com dispositivos de ajuste fino de posição.

Pode-se utilizar uma segunda lente com o intuito de ampliar a imagem de interferência, dando-lhe uma amplitude conveniente à análise.

Uma plotadora com um fotodetector substituindo a pena é usada como digitalizadora. Por meio do software, a posição de quatro vértices da imagem sobre sua área útil é formada. Uma vez tendo sido definida uma malha de discretização sobre a superfície, a plotadora, corrigindo o efeito da perspectiva, posiciona o fotodetector sobre a posição correspondente na imagem a cada ponto da malha definida. Um conversor A/D transforma o sinal de tensão emitido pelo fotodetector em um dado digital inteligível ao microcomputador. Este controla a posição XY do fotodetector e a intensidade luminosa.

As medições realizadas por este sistema não apresentam erro superior a $0,015 \mu\text{m}$, o que é bastante satisfatório para a análise da superfície de naftaleno.

Estudos mais detalhados do sistema levam a crer que com o uso de fontes de laser mais potentes e com alguns recursos de hardware seja possível medir com precisões melhores que $0,005 \mu\text{m}$. Neste limite, fatores que influenciam na estabilidade térmica e mecânica passam a ter maior importância e devem ser convenientemente considerados.

6. Conclusão

Viabilidade do projeto

Viabilidade do Projeto

Através de um estudo das técnicas de intensificação de troca de calor, foi possível idealizar e projetar um aparato experimental com o intuito de avaliar a contribuição destes métodos.

A modelagem do equipamento foi baseada na técnica de intensificação passiva de dispositivo de turbilhonamento - geradores de vórtices. Este método tem como função a geração de turbulência no escoamento produzindo rotação ou escoamento secundário.

A intensificação pode ser aplicada a diversas áreas, tais como refrigeração, ventilação, ar condicionado, ...

Neste caso, os dimensionamentos simulam um evaporador como modelo. Todos os cálculos foram baseados em um caso real.

Foi feito um estudo de três técnicas experimentais: chapa aquecida com uso de termopares ou cristal líquido e sublimação de naftaleno. Por meio de uma análise comparativa, a técnica de sublimação de naftaleno mostrou-se a mais adequada devido à sua eficiência e confiabilidade. Outro ponto favorável a esta escolha foi a disponibilidade de uma mesa de coordenadas tridimensional com a qual pode-se realizar a leitura da superfície de naftaleno, com precisão de até $0,015 \mu\text{m}$.

Levando-se em conta as considerações citadas, foi possível desenvolver um projeto perfeitamente executável, com condições de obter resultados satisfatórios à situação proposta. Dependendo das características desejadas, o projeto apresenta alternativas, tais

como três formas de superfície de naftaleno, técnicas de refrigeração da mesma, entre outras, tornando-o viável para diversas configurações.

O projeto pode ser utilizado para outras configurações de túnel de vento, sendo que, para tal alteração, basta seguir os cálculos realizados no tópico relativo à análise dimensional e semelhança.

7. Referências bibliográficas

Referências Bibliográficas

- Eckert, R.G., e Goldstein R.J., 1976, Measurements in Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, 2nd edition
- Bergles, A.E., Heat Transfer Enhancement - Second Generation Heat Transfer Technology, Apresentado no 11º ABCM Mechanical Engineering Conference, São Paulo, Brasil, Dezembro de 1991.
- The Hallcrest Handbook of Thermochromic Liquid Crystal Technology.
- Kreith, J., Princípios da Transmissão de Calor, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1973.
- Van Wylen, G.J., Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1976.
- Holman, J. P., Transferência de Calor, McGraw Hill, São Paulo, 1983.
- Gonçalves, A. A., Metodologia Automatizada para o Controle Geométrico de Superfícies de Precisão, UFSC LABMETRO, 1986.
- Yanagihara, J. I., Heat Transfer Enhancement by Vortex Generators, Proceedings of The ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, 1991.
- Mitutoyo, O Mundo da Metrologia, Informativo Técnico, Junho/1994.
- Sparrow, E. M., Forced Convection Heat Transfer at an Inclined and Yawed Square Plate - Application to Solar Collectors, Transaction of ASME - series C - Journal of Heat Transfer, Vol. 99, Nov/1977, pp 507 - 512.
- Sparrow, E. M., Heat Transfer Adjacent to the Attached End of a Cylinder in Crossflow, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 27, 1984, pp 233 - 242.

- Sparrow, E. M., Measured Heat Transfer Coefficients at and Adjacent to the Tip of a Wall-Attached Cylinder in Crossflow - Application to Fins, Transactions of ASME, series C, Vol. 103, Nov/1981, pp 778 - 784.

Apêndices

Apêndice I: Resfriamento da Camada de Naftaleno

Para o resfriamento da camada de naftaleno, diversos processos podem ser aplicados.

A idéia principal é que se faça um resfriamento lento e contínuo, com o intuito de se obter uma camada homogênea e bem formada. A morosidade no processo faz com que as bolhas de ar formadas durante a deposição do naftaleno fundido tenham tempo para um deslocamento pela camada, vindo à liberação na superfície aberta ao ambiente.

Um método muito utilizado é o "banho-maria". O molde sobre o qual o naftaleno está sendo aplicado fica submetido a um aquecimento por meio de vapor, fazendo com que a camada forme-se homogeneamente, devido à temperatura constante ao longo de todo o molde. Outra vantagem deste método é o aquecimento do molde: evita problemas de trincas e rachaduras na superfície por influência da dilatação e contração do molde. Neste caso, os dois materiais (aço e naftaleno) passam pelos processos citados de forma gradual.

Outro método geralmente aplicado, quando o molde é o tubo, é o gotejamento pausado de água no interior do mesmo. Desta forma, a solidificação vai ocorrendo da região mais interna para a mais exterior, liberando possíveis bolhas de ar e conduzindo-as para a região aberta ao ambiente, neste caso, a superior.

Outras técnicas poderiam ser descritas, no entanto, para os casos de placa e cilindro, os métodos citados apresentam as melhores condições de eficiência. Portanto, basta que se escolha a mais conveniente ao molde a ser usado.

Apêndice II: Mesa tridimensional

A figura abaixo mostra um esboço da mesa de coordenadas tridimensional:

