



**Pedro Carvalho de Oliveira**

**Desenvolvimento e comparação de métodos de  
medição experimental da emissividade:  
aplicação a superfícies de estruturas de flare  
offshore**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Sergio Leal Braga  
Co-orientador: Prof. Florian Alain Yannick Pradelle

Rio de Janeiro  
Julho de 2021



**Pedro Carvalho de Oliveira**

**Desenvolvimento e comparação de métodos de  
medição experimental da emissividade:  
aplicação a superfícies de estruturas de flare  
offshore**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

**Prof. Sergio Leal Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Florian Alain Yannick Pradelle**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dr. Epifanio Mamani Ticona**

IEPUC – PUC-Rio

**Dr. Carlos Eduardo Reuther de Siqueira**

Pesquisador Autonomo

Rio de Janeiro, 05 de Julho de 2021

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Pedro Carvalho de Oliveira**

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica.

#### Ficha Catalográfica

Oliveira, Pedro Carvalho de

Desenvolvimento e comparação de métodos de medição experimental da emissividade: aplicação a superfícies de estruturas de flare offshore / Pedro Carvalho de Oliveira; orientador: Sergio Leal Braga; co-orientador: Florian Alain Yannick Pradelle. – 2021.

111 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Radiação. 3. Espaço Anular. 4. Experimental. 5. Flare. 6. Termógrafo. 7. Incerteza. I. Braga, Sergio Leal. II. Pradelle, Florian Alain Yannick. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

À minha família, por seu apoio  
e encorajamento.

## Agradecimentos

Em primeiro lugar aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando, aconselhando e auxiliando sempre que precisei. Muito obrigado pela paciência e carinho.

À minha família por todo o suporte que me deram nesse longo caminho, principalmente ao meu irmão, meu melhor amigo.

Aos meus orientadores Sergio Braga e Florian Pradelle, por terem sido tão compreensivos e atenciosos durante todo esse processo. Agradeço pela paciência e pela grande contribuição na minha formação.

Ao Dr. Epifanio Ticona, Msc. Nestor Cotelo, Eng. Severino Wanderley e à todos os profissionais que fizeram parte desse projeto. Sem seu auxílio eu não teria conseguido.

À Petrobras, por ter patrocinado e incentivado a realização deste projeto.

À todos os colegas da PUC-Rio, por todo o apoio e camaradagem nos estudos.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado

À editora Wiley & Sons por ceder os direitos de imagem das figuras retiradas do livro *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Resumo

Oliveira, Pedro Carvalho de; Braga, Sergio Leal; Pradelle, Florian Alain Yannick. **Desenvolvimento e comparação de métodos de medição experimental da emissividade: aplicação a superfícies de estruturas de flare offshore**. Rio de Janeiro, 2021. 111p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho introduz duas técnicas de medição da emissividade da superfície de três materiais comumente utilizados nas plataformas *offshore*: cobertura de *Thermal Sprayed Aluminum* (TSA), cobertura de Jotatemp1000 e uma superfície crua de aço naval. Foram investigadas metodologias de medição de emissividade e os conceitos básicos de radiação e convecção natural. A partir disso, determina-se a modelagem do problema em questão para as estimativas de calor e emissividade. O primeiro experimento consistiu na medição da emissividade com o auxílio de um termógrafo, nesse foi realizada a comparação de medição sobre uma placa plana e um tubo revestido para o TSA e o Jotatemp1000. No segundo experimento, realizou-se a medição da emissividade através da medição das transferências de calor por convecção natural e radiação em um espaço anular. As medições neste experimento foram realizadas para diferentes pressões, para que se quantifique o efeito da convecção natural. No primeiro experimento, nota-se uma discrepância significativa entre os valores medidos nos tubos e nas placas. Constatou-se também que a emissividade de todos os materiais permaneceu praticamente constante para os valores acima de 100 °C. Observou-se uma disparidade considerável nos valores de emissividade encontradas no primeiro experimento em comparação com o segundo para o Jotatemp e aço naval. A partir dos dados, constata-se que emissividade medida com termógrafo possui uma precisão maior, por ser uma medida direta. Dentre as medições no espaço anular, o mais confiável para pequenos intervalos de temperatura é a parametrização pela superfície dada pelo *matlab*. Ainda que os resultados apresentem tais discrepâncias, pode-se observar que o Jotatemp1000 obteve os maiores valores de emissividade em todos os experimentos e o TSA os menores valores, mesmo com a incerteza experimental.

### Palavras-chave

Radiação; Espaço Anular; Experimental; Flare; Termógrafo; Incerteza.

## Abstract

Oliveira, Pedro Carvalho de; Braga, Sergio Leal (Advisor); Pradelle, Florian Alain Yannick (Co-Advisor). **Development and comparison of experimental emissivity measurement methods: application to surfaces of offshore flare structures**. Rio de Janeiro, 2021. 111p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work introduces two techniques for measuring the surface emissivity of three materials commonly used in offshore platforms: Thermal Sprayed Aluminum (TSA) coating, Jotatemp1000 coating and a raw marine steel surface. Emissivity measurement methodologies and the basic concepts of radiation and natural convection were investigated. From this, the modeling of the problem in question for the heat and emissivity estimates is determined. The first experiment consisted of measuring the emissivity with the aid of a thermographic camera, in which the measurement comparison was performed on a flat plate and a coated tube for TSA and Jotatemp1000. In the second experiment, emissivity was measured by gauging heat transfers by natural convection and radiation in an annular space. The measurements in this experiment were carried out for different pressures, in order to quantify the effect of natural convection. In the first experiment, there was a significant discrepancy between the values measured in the tubes and in the plates. It was also found that the emissivity of all materials remained practically constant for values above 100 °C. A considerable disparity was observed in the emissivity values found in the first experiment compared to the second for Jotatemp and marine steel. From the data, is verified that emissivity measured with a thermographic camera has greater precision, as it is a direct measure. Among the measurements in the annular space, the most reliable for small temperature intervals is the surface parameterization given by matlab. Although the results show such discrepancies, it can be observed that Jotatemp100 obtained the highest emissivity values in all experiments and the TSA the lowest values, even with experimental uncertainty.

## Keywords

Emissivity; Radiation; Annulus; Experiment; Thermography; Uncertaint.

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>18</b>
1.1	Motivação	18
1.2	Flare em Plataforma	22
1.3	Objetivos	28
1.4	Organização do trabalho	28
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>29</b>
2.1	Conceitos Básicos sobre Radiação	29
2.2	Troca de Calor no Espaço Anular	38
2.3	Medições de Emissividade	46
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>53</b>
3.1	Medição com Termógrafo	53
3.2	Medição em Espaço Anular	58
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>66</b>
4.1	Medição com Termógrafo	66
4.2	Medição em Espaço Anular	68
<b>5</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>	<b>98</b>
<b>6</b>	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>100</b>

## Lista de figuras

Figura 1.1	Matriz Energética Brasileira para o ano base 2019	18
Figura 1.2	Estatísticas relevantes para a produção e consumo de energia no Brasil	19
Figura 1.3	Exemplo de flare de queima única	19
Figura 1.4	Exemplo de flare de queima múltipla	20
Figura 1.5	Exemplo esquemático de <i>heat shields</i> na estrutura do <i>flare</i>	20
Figura 1.6	Tabela da norma API-521 para radiação nas plataformas	21
Figura 1.7	Exemplo de <i>single-point flare</i>	22
Figura 1.8	Exemplo de <i>multi-point flare</i>	23
Figura 1.9	Exemplo de <i>enclosed flare</i>	23
Figura 1.10	Esquemático da primeira fase de desenvolvimento dos sistemas <i>Flare</i>	24
Figura 1.11	Esquemático da segunda fase de desenvolvimento dos sistemas <i>Flare</i>	25
Figura 1.12	Esquemático da terceira fase de desenvolvimento dos sistemas <i>Flare</i>	26
Figura 1.13	Esquemático da quarta fase de desenvolvimento dos sistemas <i>Flare</i>	27
Figura 2.1	Ângulo sólido correspondente a $dA_n$ em um ponto sobre $dA_1$ no sistema de coordenadas esféricas	29
Figura 2.2	Comparação da emissão de um corpo negro e uma superfície real. Distribuição espectral (a). Distribuição direcional (b)	31
Figura 2.3	Dependência espectral da emissividade normal espectral $\varepsilon_{\lambda,n}$	32
Figura 2.4	Dependência com a temperatura da emissividade normal total $\varepsilon_n$	33
Figura 2.5	Absorção, Reflexão e Transmissão de Energia	33
Figura 2.6	Fator de Forma associado a elementos de área $dA_i$ e $dA_j$	36
Figura 2.7	Transferência de calor multimodal de uma superfície numa cavidade. <b>(a)</b> Balanço energético da superfície. <b>(b)</b> Representação esquemática.	38
Figura 2.8	Camada limite hidrodinâmica numa superfície plana	38
Figura 2.9	Camada limite térmica numa superfície plana isotérmica	39
Figura 2.10	Representação esquemática do problema	43
Figura 2.11	Funcionamento do Equipamento de <i>Integrating Spheres</i>	47
Figura 2.12	Modelo Esquemático de Medição da Emissividade no Espaço Anular	48
Figura 2.13	Medição de Emissividade com Termopar e Termômetro de Infravermelho	49
Figura 2.14	Medição de Emissividade com Cobertura e Termômetro de Infravermelho	50
Figura 2.15	Exemplo de radiometria por dispersão. 1- Corpo negro, 2- Forno da amostra, 3 e 4- Espelhos parabólicos com cobertura de ouro, 5- Tabela de rotação motorizada, 6- Roda de filtro, 7- <i>Chopper</i> óptico, 8- Monocromador, 9- Detector, 10- Amplificador, 11- Sistema de captura de dados	51

Figura 2.16	Medição de Emissividade com um Espectroscópio IVTF	52
Figura 3.1	Posicionamento da Câmera	55
Figura 3.2	Montagem do experimento realizada no laboratório de fotomecânica da PUC-Rio	55
Figura 3.3	Posicionamento do Termógrafo	56
Figura 3.4	<i>Display</i> do Controlador de Temperatura	56
Figura 3.5	Programa Utilizado para Medição da Emissividade	57
Figura 3.6	Resistência de cerâmica modular usada no aquecimento do tubo interno	60
Figura 3.7	Posicionamento dos tubos e espaço anular	61
Figura 3.8	Vista superior do espaço anular	61
Figura 3.9	Vedação do Aparato Experimental	62
Figura 3.10	Aparato do Experimento de Medição de Emissividade no Espaço Anular	63
Figura 4.1	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	68
Figura 4.2	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	69
Figura 4.3	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	69
Figura 4.4	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	70
Figura 4.5	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	70
Figura 4.6	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	71
Figura 4.7	Representação da equação 2-53 para o TSA (Tampas Re-irradiantes)	72
Figura 4.8	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	73
Figura 4.9	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	74
Figura 4.10	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	74
Figura 4.11	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	75
Figura 4.12	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	75
Figura 4.13	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	76
Figura 4.14	Representação da equação 2-53 para o Jotatemp1000 (Tampas Re-irradiantes)	77

Figura 4.15	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	78
Figura 4.16	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	79
Figura 4.17	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	79
Figura 4.18	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	80
Figura 4.19	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	80
Figura 4.20	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes	81
Figura 4.21	Representação da equação 2-53 para o Aço Naval (Tampas Re-irradiantes)	82
Figura 4.22	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito	83
Figura 4.23	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito	84
Figura 4.24	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito	84
Figura 4.25	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito	85
Figura 4.26	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito	85
Figura 4.27	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito	86
Figura 4.28	Representação da equação 2-53 para o TSA (Cilindros Infinitos)	87
Figura 4.29	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito	88
Figura 4.30	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito	89
Figura 4.31	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito	89
Figura 4.32	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito	90
Figura 4.33	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito	90
Figura 4.34	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito	91
Figura 4.35	Representação da equação 2-53 para o Jotatemp1000 (Cilindros Infinitos)	92
Figura 4.36	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito	93
Figura 4.37	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito	94

Figura 4.38	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito	94
Figura 4.39	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito	95
Figura 4.40	Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito	95
Figura 4.41	Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito	96
Figura 4.42	Representação da equação 2-53 para o Aço Naval (Cilindros Infinitos)	97

## Lista de tabelas

Tabela 3.1	Medidas Características do Experimento	59
Tabela 3.2	Tabela de Incertezas das Grandezas	65
Tabela 4.1	Emissividade da Placa e Tubo com cobertura de TSA	66
Tabela 4.2	Emissividade da Placa e Tubo com cobertura de Jotatemp 1000	66
Tabela 4.3	Emissividade do Tubo de Aço	66
Tabela 4.4	Emissividade média relativo às tabelas 6.1, 6.2 e 6.3	68
Tabela 4.5	Emissividade média relativo às tabelas 6.7, 6.8 e 6.9	73
Tabela 4.6	Emissividade média relativo às tabelas 6.13, 6.14 e 6.15	78
Tabela 4.7	Emissividade média relativo às tabelas 6.4, 6.5 e 6.6	83
Tabela 4.8	Emissividade média relativo às tabelas 6.10, 6.11 e 6.12	88
Tabela 4.9	Emissividade média relativo às tabelas 6.16, 6.17 e 6.18	93
Tabela 6.1	Emissividade do TSA à pressão de 1 atm - Hipótese das tampas reirradiantes	102
Tabela 6.2	Emissividade do TSA à pressão de 0,5 atm - Hipótese das tampas reirradiantes	102
Tabela 6.3	Emissividade do TSA à pressão de 0,03 atm - Hipótese das tampas reirradiantes	103
Tabela 6.4	Emissividade do TSA à pressão de 1 atm - Hipótese dos cilindros infinitos	103
Tabela 6.5	Emissividade do TSA à pressão de 0,5 atm - Hipótese dos cilindros infinitos	104
Tabela 6.6	Emissividade do TSA à pressão de 0,03 atm - Hipótese dos cilindros infinitos	104
Tabela 6.7	Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 1 atm - Hipótese das tampas reirradiantes	105
Tabela 6.8	Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 0,5 atm - Hipótese das tampas reirradiantes	105
Tabela 6.9	Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 0,03 atm - Hipótese das tampas reirradiantes	106
Tabela 6.10	Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 1 atm - Hipótese dos cilindros infinitos	106
Tabela 6.11	Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 0,5 atm - Hipótese dos cilindros infinitos	107
Tabela 6.12	Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 0,03 atm - Hipótese dos cilindros infinitos	107
Tabela 6.13	Emissividade do aço naval à pressão de 1 atm - Hipótese das tampas reirradiantes	108
Tabela 6.14	Emissividade do aço naval à pressão de 0,5 atm - Hipótese das tampas reirradiantes	108
Tabela 6.15	Emissividade do aço naval à pressão de 0,03 atm - Hipótese das tampas reirradiantes	109
Tabela 6.16	Emissividade do aço naval à pressão de 1 atm - Hipótese dos cilindros infinitos	109

Tabela 6.17	Emissividade do aço naval à pressão de 0,5 atm - Hipótese dos cilindros infinitos	110
Tabela 6.18	Emissividade do aço naval à pressão de 0,03 atm - Hipótese dos cilindros infinitos	110
Tabela 6.19	Tabela de Emissividade das Superfícies	111

## Lista de Abreviaturas

1	-	Índice referente a superfície externa do tubo interno
2	-	Índice referente a superfície interna do tubo externo
3	-	Índice referente a superfície das tampas de vedação
$A_i$	$m^2$	Área da superfície $i$
$A_{lm}$	$m^2$	Área logarítmica média
$A_n$	$m^2$	Elemento de área nas coordenadas esféricas
$b$	-	Índice referente aos corpos negros
$c_0$	$m/s$	Velocidade da luz no vácuo
$c_p$	$J/(K \cdot kg)$	Calor específico à pressão constante
$c_v$	$J/(K \cdot kg)$	Calor específico à volume constante
$d_{ar}$	$kg/m^3$	Densidade do ar
$d_e$	$m$	Diâmetro externo do tubo interno
$d_i$	$m$	Diâmetro interno do tubo interno
$D_e$	$m$	Diâmetro externo do tubo externo
$D_i$	$m$	Diâmetro interno do tubo externo
$D_h$	$m$	Diâmetro hidráulico do espaço anular
$E$	$W/m^2$	Poder emissivo do corpo
$F_{ij}$	-	Fator de forma da superfície $i$ em relação a $j$
$g$	$m/s^2$	Aceleração da gravidade
$G$	$W/m^2$	Irradiação do corpo
$Gr$	-	Número de Grashof
$h$	$J \cdot s$	Constante de Planck
$h_c$	$W/(m^2 \cdot K)$	Coefficiente de troca de calor por convecção
$I$	$W/m^2$	Intensidade radiativa
$k$	$W/(m \cdot K)$	Condutividade térmica
$k_B$	$J/K$	Constante de Boltzmann
$Kn$	-	Número de Knudsen
$L$	$m$	Comprimento do tubo
$m$	$kg$	Massa do gás
$Nu$	-	Número de Nusselt
$P$	$Pa$	Pressão absoluta
$q$	$W/m^2$	Fluxo de calor por elemento de área
$Q_c$	$W$	Fluxo de calor de convecção natural
$Q_r$	$W$	Fluxo de calor de radiação
$r$	$m$	Dimensão radial
$R$	$J/(mol \cdot K)$	Constante universal dos gases
$R_i$	$m^{-2}$	Resistência térmica referente ao processo $i$
$R_{eq}$	$m^{-2}$	Resistência térmica equivalente da radiação
$t$	$m$	Espessura das paredes dos tubos
$T$	$K$	Temperatura
$V$	$m^3$	Volume

$\alpha$	-	Absortividade
$\gamma$	$m$	Comprimento característico da troca de calor
$\delta$	$m$	Diâmetro molecular do ar
$\delta x$	-	Incerteza relativa a medição da grandeza $x$
$\varepsilon$	-	Emissividade
$\eta$	$m$	Percurso médio entre as moléculas
$\theta$	$rad$	Ângulo zenital
$\lambda$	$m$	Comprimento de onda
$\mu$	$Pa \cdot s$	Viscosidade
$\rho$	-	Refletividade
$\sigma$	$W/m^2 \cdot K^4$	Constante de Stefan-Boltzmann
$\phi$	$rad$	Azimute

*“(...) aliás, toda ciência seria supérflua se houvesse coincidência imediata entre a aparência e a essência das coisas (...)”*

**Karl Marx** , *O Capital – crítica da economia política.*

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

Seguindo a tendência internacional, o setor energético brasileiro tem aumentado seu foco na utilização de energias renováveis, em uma matriz historicamente com alta participação destas fontes de energia. Entretanto, sua principal fonte energética em 2019 permanece sendo o petróleo, seus derivados, gás natural e carvão mineral como apresentado na figura 1.1. Estas fontes somam quase 52% da oferta interna de energia no país, com 34,4%, 12,2% e 5,3% do total, respectivamente. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2020 com ano base de 2019 (1), houve um aumento de 7,6% na produção de petróleo e seus derivados e de 9,5% na produção de gás natural entre os anos de 2018 e 2019 como representado na figura 1.2. Este crescimento está diretamente ligado ao aumento da produção no pré-sal que hoje representa 66,8% da produção de petróleo no Brasil (2).

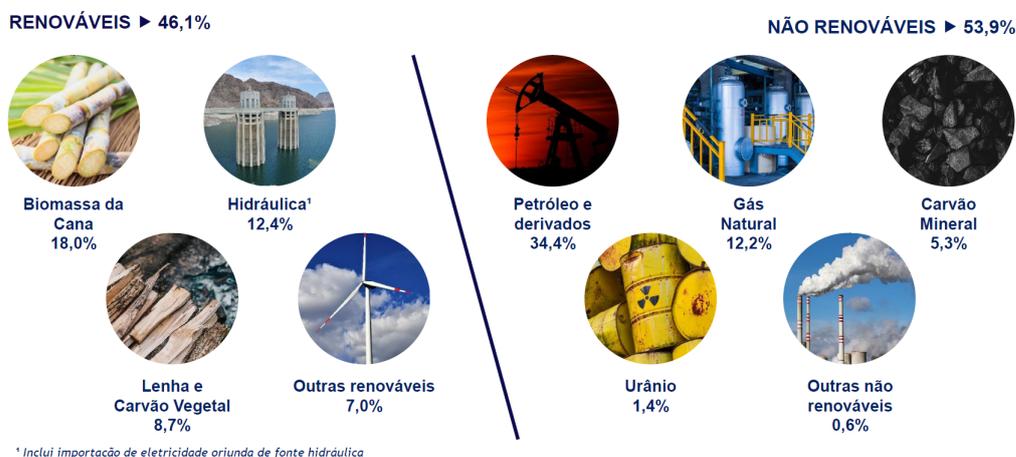


Figura 1.1: Matriz Energética Brasileira para o ano base 2019 (1)

Durante o processo de extração de petróleo, são também retiradas quantidades significativas de gás natural dos poços. Apesar da reinjeção de parte desse gás natural ter se intensificado nos últimos anos para aumentar a eficiência da recuperação do óleo (3), parte desse gás não pode ser reinjetado ou escoado por uma linha de dutos para transporte e distribuição. É necessário que este processo seja realizado de forma segura e que o excesso de gás não armazenado ou reinjetado possa ser queimado para evitar emissões de

hidrocarbonetos na atmosfera. O *flare* é um equipamento de segurança onde ocorre a queima dos gases quando há despressurização de equipamentos.

Parâmetros	Unidade	2018	2019	$\Delta$ 19/18
Produção de Petróleo <sup>1</sup>	10 <sup>3</sup> bbl/dia	2.592,7	2.790,7	7,6%
Produção de Gás Natural	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /dia	111,9	122,5	9,5%
Geração de Energia Elétrica	TWh	601,4	626,3	4,1%
Consumo de Combustíveis Líquidos	10 <sup>6</sup> l/dia	353,2	364,7	3,3%
Consumo de Energia Elétrica	TWh	538,4	545,6	1,3%
Oferta Interna de Energia (OIE)	10 <sup>6</sup> tep	289,9	294,0	1,4%
Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) <sup>2</sup>	TWh	636,4	651,3	2,3%
População	10 <sup>6</sup> hab	209,3	211,0	0,8%
PIB [2010] <sup>3</sup>	10 <sup>9</sup> US\$	2.945,8	2.979,3	1,1%

Figura 1.2: Estatísticas relevantes para a produção e consumo de energia no Brasil (1)

Como dito anteriormente, os flares são equipamentos utilizados extensivamente no setor de petróleo e gás. Além da aplicação na exploração e produção deste setor é também de uso fundamental no setor petroquímico para uma liberação segura e confiável de gases e líquidos durante o processo operacional normal ou em casos de emergência (4). Trata-se de um elemento essencial para garantir a segurança da instalação. O projeto do flare deve atender a vários critérios técnicos para definir a estrutura de suporte. Além disso, é necessário determinar o tipo de queimador (queima única ou múltipla) exibido nas figuras 1.3 e 1.4, assim como seu dimensionamento (com uma altura máxima de 150m) e a inclusão de um projeto térmico detalhado.



Figura 1.3: Exemplo de flare de queima única (5)



Figura 1.4: Exemplo de flare de queima múltipla (5)

É de extrema importância este cuidado prévio no planejamento deste equipamento, visto que a irradiação solar somada à dos gases queimados no *flare* pode ter impactos altamente danosos sobre equipamentos, tubulações, superfícies em geral e danos graves a saúde humana (6). O mal dimensionamento também pode afetar o bom funcionamento da produção em campo devido à temperatura superficial elevada. Para impedir que ocorram estes tipos de problemas é comum que sejam instalados equipamentos de segurança tal qual o *heat shield* retratado na figura 1.5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1721776/CA

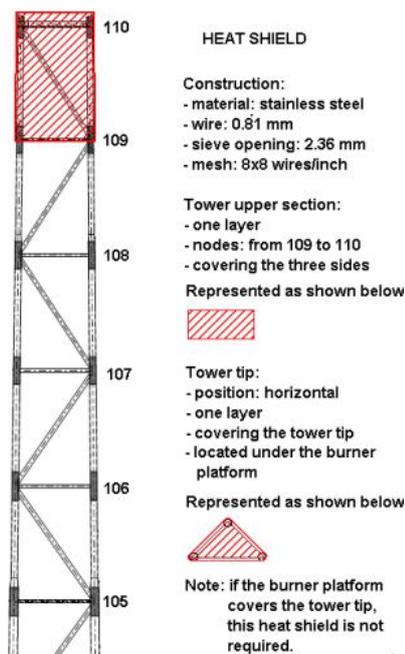


Figura 1.5: Exemplo esquemático de *heat shields* na estrutura do *flare* (7)

Os *heat shields* são de extrema importância para a manutenção de temperaturas aceitáveis nas plataformas. Como pode-se destacar na figura 1.6, a radiação máxima aceitável para o trabalho contínuo é de  $1577 \text{ W/m}^2$ . É importante destacar que mesmo com roupas apropriadas para o trabalho, o ser humano suporta apenas alguns segundos com uma irradiação de  $5 \text{ kW/m}^2$  (6).

Permissible design level (PDL)		Conditions
Btu/h.ft <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	
3000	9460	Maximum radiant heat intensity at any location where urgent emergency action by personnel is required. When personnel enter or work in an area with the potential for radiant heat intensity greater than $6310 \text{ W/m}^2$ ( $2000 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{h}$ ), then radiation shielding and/or special protective apparel (e.g. a fire approach suit) should be considered. <b>SAFETY PRECAUTION - It is important to recognize that personnel with appropriate clothing <sup>(a)</sup> cannot tolerate radiation at <math>6310 \text{ W/m}^2</math> (<math>2000 \text{ Btu/h.ft}^2</math>) for more than a few seconds.</b>
2000	6310	Maximum radiant heat intensity in areas where emergency actions lasting up to 30 s can be required by personnel without shielding but with appropriate clothing <sup>(a)</sup> .
1500	4730	Maximum radiant heat intensity in areas where emergency actions lasting 2 minutes to 3 minutes can be required by personnel without shielding but with appropriate clothing <sup>(a)</sup> .
500	1577	Maximum radiant heat intensity at any location where personnel with appropriate clothing <sup>(a)</sup> can be continuously exposed.
<sup>(a)</sup> Appropriate clothing consists of a hard hat, long sleeved shirt with cuffs buttoned, work gloves, long-legged pants and work shoes. Appropriate clothing minimizes direct skin exposure to thermal radiation.		

Figura 1.6: Tabela da norma API-521 para radiação nas plataformas (7)

O crescimento da produção de óleo e gás nas plataformas *offshore* naturalmente causou um aumento no tamanho e peso dos equipamentos a bordo (4). Isso afeta diretamente no dimensionamento do flare assim como no tipo escolhido para cada situação. Com o objetivo de atingir níveis de segurança satisfatórios, mesmo nas condições mais exigentes de operação, são utilizadas correlações, valores tabelados e dados físicos das instalações e diversos outros parâmetros. Entretanto, nem sempre se dispõe de valores seguros para emissividade ou transferência de calor para a execução dos cálculos. Cada situação exigirá que a metodologia seja adequada para o caso específico, por exemplo, se o *flare* tem *heat shield* ou não, quais são os materiais revestindo os equipamentos próximos ao flare, em particular a sua estrutura, coberturas de fontes quentes, etc. Além disso é necessário um estudo das condições transientes da chama devido à direção do vento, mudanças de vazão de gás e variações climáticas diversas para que se tenha um estudo mais completo do funcionamento deste equipamento que não pode ser descrito apenas com a metodologia padrão.

## 1.2

### Flare em Plataforma

Como descrito anteriormente, os flares são equipamentos utilizados na indústria de óleo e gás para a queima segura de gases e líquidos. Usualmente, as substâncias queimadas nos flares são misturas gasosas de componentes que podem variar de hidrogênio até hidrocarbonetos pesados. Esses gases podem conter substâncias danosas e até mesmo tóxicas aos seres humanos e ao meio ambiente. Por isso, devem ser queimados para prevenir danos a saúde e reduzir o impacto no meio ambiente, já que emissões de hidrocarbonetos são mais prejudiciais ao meio ambiente que os produtos de combustão (6).

A vazão de um flare pode variar desde 50  $kg/h$  até  $5 \times 10^6$   $kg/h$  e, em situações de emergência, podem produzir chamas de dezenas ou até centenas de metros, com transferência de calor de centenas de  $MW$  (5). Como são equipamentos que devem funcionar continuamente flares são projetados para trabalhar sem manutenções por longos períodos de tempo, em geral de 3 à 5 anos. Existem três tipos de flares que são utilizados na indústria petroquímica: *Single-point flares*, *multi-point flares* e *enclosed flares* (5).



Figura 1.7: Exemplo de *single-point flare* (5)

*Single-point Flares* podem ser projetados sem supressão de fumaça ou com supressão de fumaça com auxílio de ar ou vapor. São projetados para que seu ponto de descarga fique localizado num nível superior aos equipamentos nos arredores e, em geral, são orientados para cima. Esse tipo de flare é muito comum nas indústrias on-shore que operam em baixa pressão (inferior a 10  $psi$ ), um exemplo desta categoria de equipamentos pode ser visto na figura 1.7.



Figura 1.8: Exemplo de *multi-point flare* (5)

*Multi-point Flares* são utilizados principalmente para uma queima mais completa do gás de exaustão. Isto é feito direcionando o gás por múltiplos pontos de queima, que pode ser dividido em etapas, numa matriz de queima ou numa torre elevada, como demonstrado na figura 1.8.



Figura 1.9: Exemplo de *enclosed flare* (5)

*Enclosed Flares* são comumente utilizados para ocultar a chama da queima de gases e para a diminuição da radiação térmica e da poluição sonora nos arredores, como apresentado na figura 1.9. Tipicamente, só uma fração da capacidade dos *enclosed flares* é utilizada em situações normais, visto que o objetivo principal é ocultar a queima dos arredores, conforme taxas mais altas de queima são necessárias são liberados outros estágios de queima para maximizar a eficiência em todas as situações (5).

Conforme o desenvolvimento tecnológico dos componentes das platafor-

mas *off-shore* foi ocorrendo, houve um aumento significativo nas estruturas dos *flares*. Em geral, o fator limitante para tal fato é a estrutura de suporte do *flare*, que por sua vez é determinada de acordo com fluxo de calor por radiação emitido pelo mesmo. Apesar da estrutura de suporte já ter atingido seu tamanho limite, as capacidades dos *flares* só vem aumentando. Isto é possível graças ao aumento de eficiência nos novos sistemas. De acordo com Pagot et al. (4), pode-se dividir a evolução dos sistemas flare em quatro etapas cronológicas, apenas para fins didáticos.

A primeira fase consistiu de *flares* que performavam o trabalho por uma única estrutura e o gás da queima sofria exaustão por uma única saída de tubulação. Uma visão resumida do funcionamento destes *flares* pode ser vista na figura 1.10. Assim, todos os sistemas descarregavam os gases simultaneamente, isto requisita que os gases de queima sejam descarregados na menor pressão de todos os sistemas, visto que estes sistemas precisam ser capazes de liberar seus excessos de pressão no mesmo *flare*. Baixas pressões geram regimes de baixa turbulência. Conseqüentemente, a eficiência da queima do gás diminui, o que produz chamas mais poluentes, com particulado e com maior emissão de radiação. Este tipo de chama é muito danoso para os equipamentos no entorno e requerem manutenções muito frequentes para um funcionamento otimizado (4).

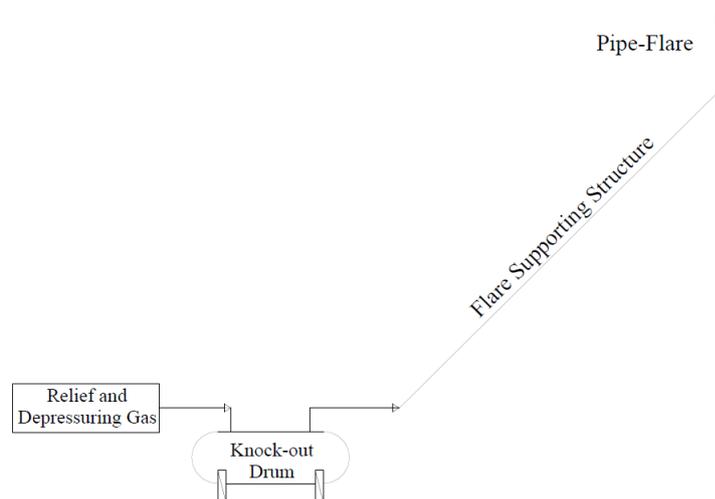


Figura 1.10: Esquemático da primeira fase de desenvolvimento dos sistemas *Flare* (4)

A segunda fase do desenvolvimento trouxe um sistema combinado, um sistema de baixa pressão de tubulação única com um sistema de alta pressão de tubulação múltipla, como pode ser observado na figura 1.11. O sistema de baixa pressão utiliza gases de alta qualidade e elevado poder calorífico, o que

facilitava sua queima sem a necessidade de acelerantes, a não ser em situações de baixa vazão. O sistema de alta pressão é de um *multiflare*, ou seja, um *flare* com diversos estágios de queima. Cada estágio é composto por diversos queimadores, sendo cada queimador composto por diversos braços radiais com tubos de exaustão espaçados de acordo com a necessidade de cada projeto. Como este modelo separa o escoamento em centenas ou milhares de tubos menores, é comum que se alcancem velocidades próximas a do som no gás de exaustão (4).

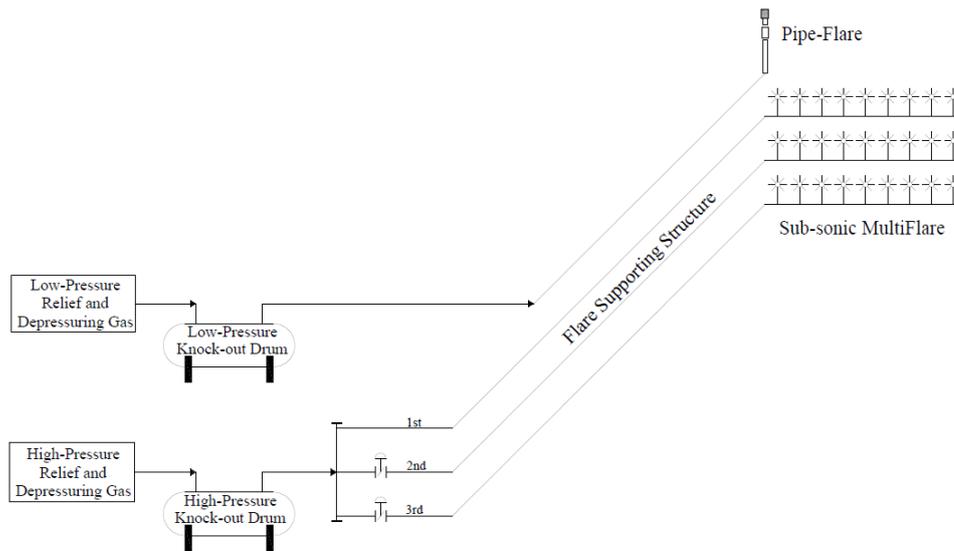


Figura 1.11: Esquemático da segunda fase de desenvolvimento dos sistemas *Flare* (4)

Na terceira fase, apresenta-se novamente um sistema *flare* combinado: um sistema *multiflare* sônico de alta pressão e um *multiflare* subsônico de baixa pressão, demonstrado pela figura 1.12. O primeiro sistema atua em velocidades próximas a do som e altas pressões, o segundo em velocidades subsônicas e baixas pressões. Com as maiores restrições impostas sobre as quantidades de sal e água contidas na produção de óleo, foi necessário um aumento na temperatura de tratamento principalmente para óleos mais pesados. Houve também uma queda na pressão de tratamento do óleo para melhor estabilização. Assim, os gases a serem queimados passaram a ter uma composição mais pesada e com altos teores de água. Para lidar com essa questão, foi necessário aumentar a vazão de gases injetada para auxiliar na combustão mais completa destes gases. Com o aumento das vazões para os sistemas de alta pressão, o sistema apresentado na fase 2 se tornaram muito grandes e pesados. A solução encontrada foi o aumento dos diâmetros dos bocais de queima, anteriormente eram de 2 *pol* e passaram para até 4 *pol*. Isso gerou uma necessidade de aumento considerável na pressão de trabalho desses queimadores causando

uma velocidade de saída sônica em praticamente todos os regimes de trabalho. Como os diâmetros dos bocais de queima passaram a ser muito maiores, as chamas produzidas passaram a ser até 5 vezes maiores, causando um aumento na transferência de calor por radiação apesar dos benefícios estruturais. Para diminuir estes efeitos, foi implementado um sistema de injeção de água no centro dos bocais. A água ajuda a reduzir a radiação de duas formas: primeiramente usando parte do calor emitido para sua evaporação e, conseqüentemente, diminuindo a temperatura da chama, mas também dificultando a formação de fuligem que é um dos principais fatores de aumento de radiação em chamas (4).

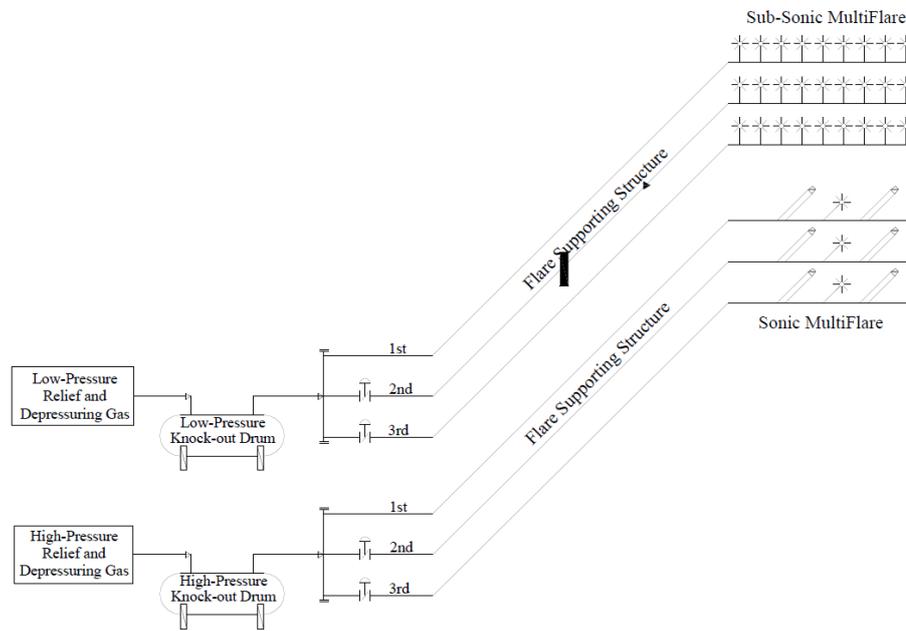


Figura 1.12: Esquemático da terceira fase de desenvolvimento dos sistemas *Flare* (4)

Por fim, a quarta fase foi composto por: um sistema *multiflare* de alta pressão com bocal variável e um *multiflare* subsônico de baixa pressão, apresentado na figura 1.13. O sistema de baixa pressão é o mesmo apresentado na fase anterior. Com as variações de vazão necessárias para o funcionamento adequado dos sistemas *flare*, foram implementados sistemas de válvulas altamente complexos. Isso requeria um treinamento avançado da equipe de manutenção para manter a integridade do queimador. A solução encontrada foi a de um bocal de abertura variável, tornando o sistema de válvulas desnecessário, agora a vazão poderia ser controlada diretamente na saída do gás (4).

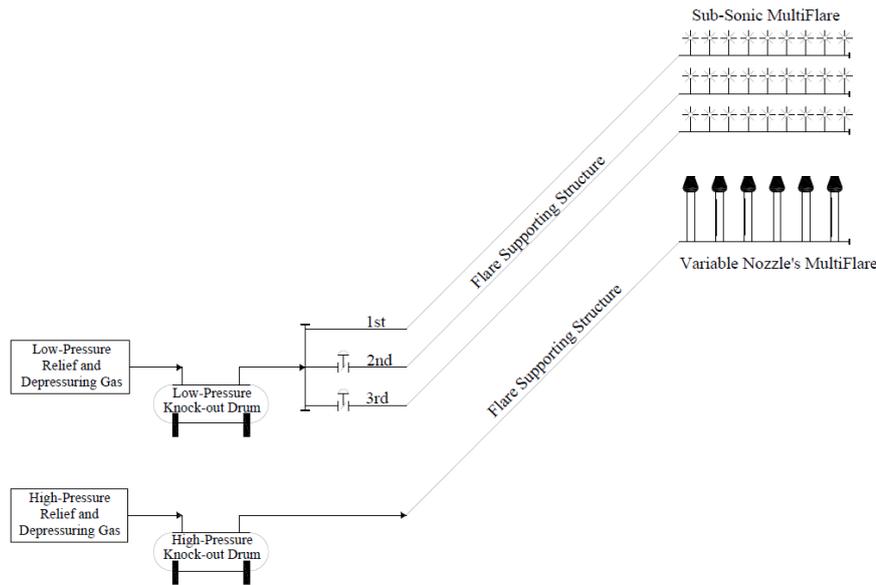


Figura 1.13: Esquemático da quarta fase de desenvolvimento dos sistemas *Flare* (4)

De forma geral, os *flares* são constituídos por um queimador, uma estrutura de suporte, tubulação e equipamentos auxiliares, tais como o *knockout drum* e o *liquid seal*. *Knockout drums* são utilizados para remover ou acumular líquidos condensados no gás de exaustão. *Liquid seals* são projetados para impedir que a queima de gás retorne pelo tubo danificando o equipamento. Também podem ser usados controladores de supressão de fumaça, sopradores e outros equipamentos de monitoramento de parâmetros do processo de queima. O projeto do *flare* depende do tipo de gás a ser queimado, as vazões características, temperaturas, etc. O dimensionamento do sistema levará em conta o número de válvulas de descarregando nos tubos de distribuição ou comunicação (5).

A queima do gás gera uma alta taxa de transferência de calor por radiação, uma fração dessa é recebida pelas superfícies nos arredores. Esta consideração é de extrema importância para o projetar o sistema do *flare*. Usualmente é possível aumentar a altura da torre do *flare* ou criar uma zona restrita de acesso no entorno do mesmo para mitigar estes efeitos. Para projetos em áreas com mais restrições pode ser interessante o projeto de *enclosed flares* pode ser necessário. Também é comum o uso de borrifadores de água para diminuir a radiação. Regulações ambientais exigem que muitos *flares* cumpram requisitos de opacidade da fumaça exaustada. Em geral, isso ocorre quando a vazão produz uma mistura entre o gás de exaustão e o ar. para o caso de pressões de exaustão não adequadas podem ser utilizadas outras formas de energia podem ser utilizadas para alcançar este objetivo (5).

### 1.3

#### Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de determinar as emissividades de três superfícies que possivelmente serão utilizados como cobertura da estrutura do *flare* a ser estudado. Para isso, foram usadas duas metodologias de medição da emissividade, inicialmente através de um termógrafo, ou seja, de forma direta, e de forma indireta com medição da transferência de calor em um espaço anular. Serão testadas três superfícies, duas com materiais de cobertura e uma superfície sem cobertura. Será analisado o comportamento da emissividade de cada material para uma mesma faixa de temperatura, compatível com as temperaturas do caso real, e por fim deve-se determinar qual material mais adequado para a aplicação na estrutura dos *heat shields*.

### 1.4

#### Organização do trabalho

O presente trabalho se divide em 5 capítulos, organizados da seguinte maneira. O primeiro capítulo tem como objetivo introduzir o tema e sua relevância para a indústria petroquímica. O segundo capítulo propõe uma revisão bibliográfica de conceitos fundamentais para o entendimento do trabalho em questão e o estado da arte sobre as formas de medição de emissividade, assim como a proposta de modelagem para o problema em questão. O terceiro capítulo objetiva explicar a metodologia utilizada para as medições de emissividade e os procedimentos experimentais adotados em ambos os métodos. O quarto capítulo apresenta os resultados encontrados nos experimentos, os tratamentos de dados realizados e a análise crítica dos resultados obtidos. O quinto e último capítulo visa apresentar as conclusões obtidas a partir de toda a análise realizada e as indicações para trabalhos futuros.

## 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1

#### Conceitos Básicos sobre Radiação

A transferência de calor por radiação entre dois corpos ocorre quando há uma diferença de temperatura entre os mesmos. É comum avaliar este fenômeno analisando superfícies sólidas, mas a radiação ocorre em todos os estados da matéria e está associada a mudanças na configuração eletrônica dos átomos ou moléculas. Diferentemente das transferências por condução ou convecção, a radiação não precisa de um meio para se propagar, visto que seu mecanismo de transporte são ondas eletromagnéticas ou alternativamente fótons. Dentre as mais conhecidas formas, destacam-se as ondas eletromagnéticas, onde pode-se salientar a luz visível, infravermelho, ondas de rádio e etc. Devido a sua natureza de propagação, é necessária a utilização de coordenadas esféricas em seu tratamento matemático, em particular da noção de ângulo sólido, para que a radiação seja descrita de forma correta (8).

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} \quad (2-1)$$

Onde  $r$  ( $m$ ) é a dimensão radial,  $\theta$  ( $rad$ ) o ângulo zenital e  $\phi$  ( $rad$ ) o azimute.  $d\omega$  ( $sr$ ) representa um ângulo sólido diferencial, referente a área  $dA_n$  ( $m^2/m^2$ ).

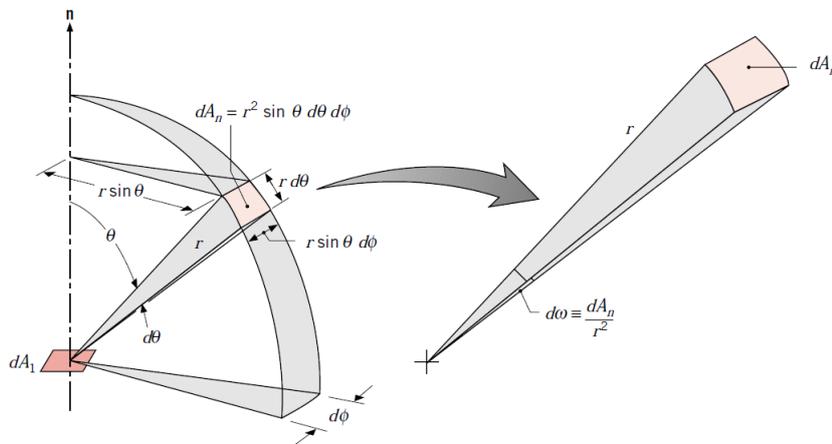


Figura 2.1: Ângulo sólido correspondente a  $dA_n$  em um ponto sobre  $dA_1$  no sistema de coordenadas esféricas (8)

### 2.1.1

#### Radiação de Corpos Negros e Corpos Reais

Para a avaliação do poder emissivo e de irradiação das superfícies reais, é necessário quantificar as intensidades espectrais da radiação emitida por esses corpos. Para isso, é fundamental a introdução do conceito de corpo negro(8):

1. Corpos negros absorvem toda radiação incidente, independente da direção ou comprimento de onda.
2. Para uma determinada temperatura e comprimento de onda, nenhum corpo pode emitir mais radiação que um corpo negro.
3. Corpos negros são emissores difusos. Apesar da radiação emitida por um corpo negro ser uma função do comprimento de onda e da temperatura, esta é independente da direção.

O corpo negro serve como um padrão de comparação para os corpos reais, visto que este é um absorvedor e emissor perfeito. No entanto, nenhuma superfície real possui essas propriedades, a aproximação mais adequada para um corpo negro é a de uma cavidade com temperatura interna uniforme. Qualquer radiação que entre por uma pequena abertura sofrerá muitas reflexões, porém será quase totalmente absorvida. A partir de princípios termodinâmicos, pode-se afirmar que a emissão por esta pequena abertura só dependerá da temperatura interna da cavidade e seria correspondente a emissão difusa de um corpo negro (8).

A intensidade espectral dos corpos negros já é bem conhecida e foi determinada por Planck como (8):

$$I_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{2hc_o^2}{\lambda^5 [\exp(hc_o/\lambda k_B T) - 1]} \quad (2-2)$$

Onde  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  e  $k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  são, respectivamente, as constantes universais de Planck e Boltzmann,  $c_o \text{ (m/s)}$  é a velocidade da luz no vácuo,  $T \text{ (K)}$  a temperatura absoluta do corpo negro e  $\lambda \text{ (m)}$  o comprimento de onda. Como o corpo negro é um emissor difuso, o poder emissivo espectral do mesmo pode ser descrito como (8):

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,b}(\lambda, T) \quad (2-3)$$

$$E_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (2-4)$$

$$C_1 = 2\pi \cdot h \cdot c_o^2 \quad ; \quad C_2 = \frac{h \cdot c_o}{k} \quad (2-5)$$

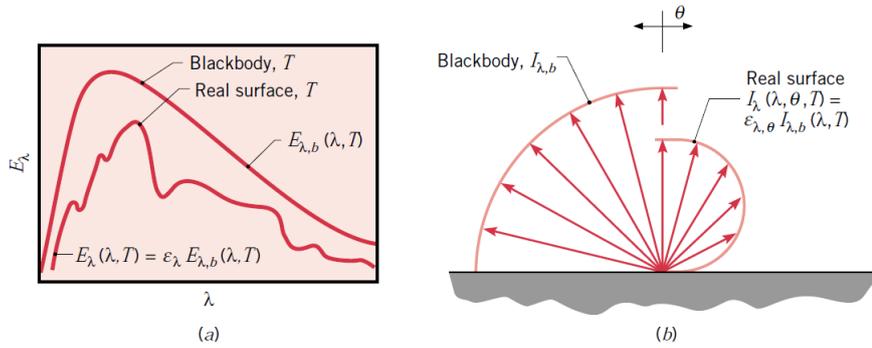


Figura 2.2: Comparação da emissão de um corpo negro e uma superfície real. Distribuição espectral (a). Distribuição direcional (b) (8)

Utilizando o poder emissivo espectral e integrando-o de 0 à  $\infty$  encontra-se poder emissivo total do corpo negro, descrito pela lei de Stefan-Boltzmann (8):

$$E_b = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda = \sigma T^4 \quad (2-6)$$

Onde  $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  é a constante de Stefan-Boltzmann. Este resultado simples, porém muito importante, permite que o cálculo da radiação emitida por um corpo negro em todas as direções e para todos os comprimentos de onda sejam feitos apenas com o conhecimento de sua temperatura (8).

A partir dessas definições, pode-se agora analisar o comportamento de corpos reais, para isso definiu-se uma propriedade da superfície radiante chamada *emissividade*. Esta propriedade representa a razão entre o poder emissivo de um corpo real e o poder emissivo do corpo negro a mesma temperatura (8).

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2-7)$$

Entretanto, é possível que haja interesse na emissividade espectral direcional dessa superfície, a qual é definida por (8):

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (2-8)$$

Em algumas situações, pode ser desejável trabalhar com médias direcionais de emissividade, ou seja, com a emissividade hemisférica espectral (8):

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)} \quad (2-9)$$

Alguns exemplos de emissividades e suas dependência com o comprimento de onda e temperatura foram exibidos, respectivamente, nas figuras 2.3 e 2.4. Para os casos de intervalos de temperatura não muito extensos, é possível aproximar a emissividade do intervalo como constante, por exemplo como observa-se ver na figura 2.4 a emissividade do alumínio à 900 K equivale à aproximadamente 0.58, já para a temperatura de 1100 K esta equivale à aproximadamente 0.51. Ou seja, num intervalo de 200 K a emissividade variou pouco mais de 10% de seu valor total (8).

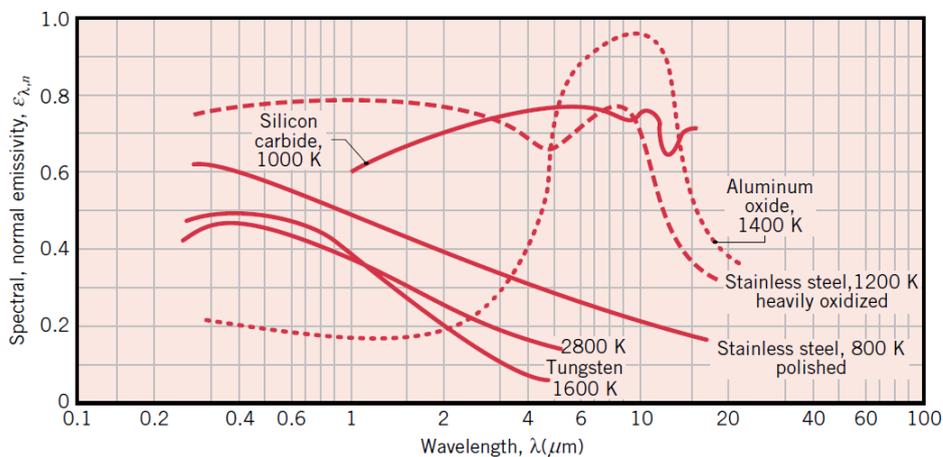


Figura 2.3: Dependência espectral da emissividade normal espectral  $\varepsilon_{\lambda,n}$  (8)

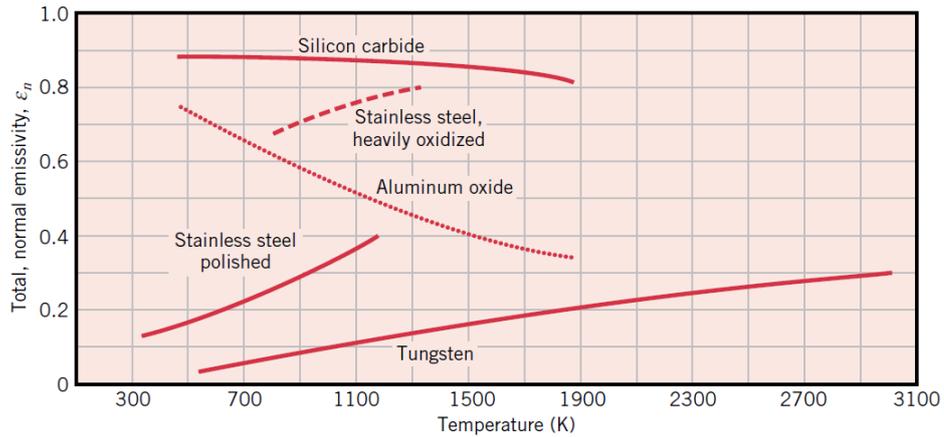


Figura 2.4: Dependência com a temperatura da emissividade normal total  $\epsilon_n$  (8)

### 2.1.2 Absorção, Reflexão e Transmissão de Superfícies Reais

Numa superfície translúcida, a irradiação incidente proveniente de diferentes fontes sofrerá três processos de transferência de energia. Parte dessa irradiação incidente será refletida pela superfície, parte será absorvida e parte será transmitida (8).

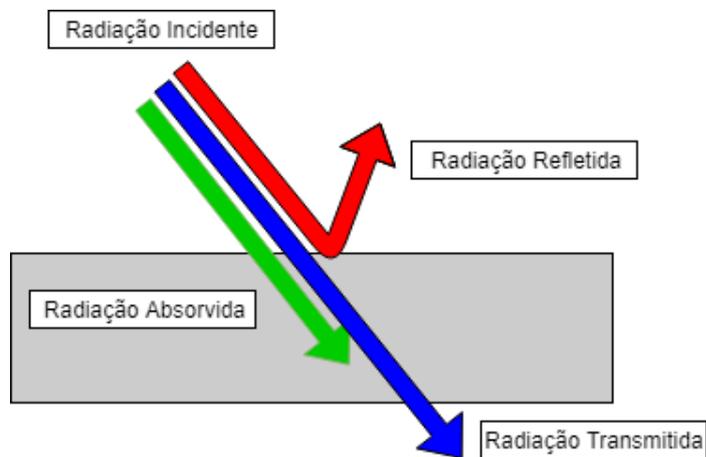


Figura 2.5: Absorção, Reflexão e Transmissão de Energia (elaboração própria)

Como ilustrado na figura 2.5, pode-se determinar a irradiação total como:

$$G_\lambda = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr} \quad (2-10)$$

Onde  $G_\lambda$  ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) é a irradiação espectral incidente no corpo,  $G_{\lambda,ref}$  ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) a fração dessa irradiação espectral refletida,  $G_{\lambda,abs}$  ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) a fração absorvida e  $G_{\lambda,tr}$  ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) a fração transmitida (8).

A absorvidade de uma superfície é a propriedade que determina a fração da radiação absorvida pela superfície em questão. No caso da absorvidade espectral direcional, tem-se (8):

$$\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,i,abs}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (2-11)$$

Onde  $I_{\lambda,i,abs}$  ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) é irradiação absorvida pela superfície e  $I_{\lambda,i}$  ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) a irradiação total sobre a superfície  $i$ . Esta correlação pode ser simplificada para a absorvidade hemisférica total como (8):

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} \quad (2-12)$$

A refletividade da superfície é a propriedade que determina a fração de radiação incidente que é refletida pela superfície. Analogamente para o caso da absorvidade, tem-se (8):

$$\rho_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \phi) = \frac{I_{\lambda,i,ref}(\lambda, \theta, \phi)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \phi)} \quad (2-13)$$

Sendo  $I_{\lambda,i,ref}$  ( $W/m^2 \cdot \mu m$ ) a irradiação refletida. Simplificando a expressão para a refletividade hemisférica total, obtém-se (8):

$$\rho = \frac{G_{ref}}{G} \quad (2-14)$$

Por fim, a transmissividade da superfície é a propriedade que determina a fração de radiação incidente que é transmitida pela superfície. A avaliação desta grandeza para superfícies semitransparentes é de formulação mais complexa, no entanto, resultados razoáveis podem ser encontrados calculando-se a transmissividade hemisférica (8):

$$\tau_\lambda = \frac{G_{\lambda,i,tr}(\lambda)}{G_{\lambda,i}(\lambda)} \quad (2-15)$$

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G} \quad (2-16)$$

Em geral, a determinação destes fatores é complexa e depende muito de fatores volumétricos do meio e do tipo de material em questão. Entretanto, em grande parte dos problemas de engenharia, e coincidentemente no presente neste trabalho, o meio em questão é opaco. Isto resulta em  $G_{\lambda, tr} = 0$ , com isto os outros dois fenômenos podem ser tratados como efeitos da superfície, facilitando o problema. A partir destas correlações para absorvidade, refletividade e sabendo que trata-se de um meio opaco, ou seja, com transmissividade nula, obtém-se, com o auxílio da equação 2-10 a seguinte correlação (8):

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2-17)$$

### 2.1.3 Lei de Kirchhoff

Considere uma superfície delimitada por uma cavidade com temperatura homogênea  $T_s$  (formando assim um corpo negro), dentro do qual estão contidos diversos corpos de dimensões muito menores que a da cavidade. Como os corpos tem dimensão negligenciável em comparação com a cavidade, os mesmos possuem influência desprezível no radiação interna. Logo, toda a radiação recebida por cada corpo nesta cavidade é difusa e igual ao poder emissivo de um corpo negro (8):

$$G = E_b(T_s) \quad (2-18)$$

No regime permanente, todos os corpos estão em equilíbrio térmico e portanto suas respectivas temperaturas devem ser iguais  $T_1 = T_2 = \dots = T_i$  e a taxa de transferência de energia deve ser zero, ou seja, a energia recebida por um desses corpos menos a energia emitida deve ser zero (8):

$$\alpha_i G A_i - E_i(T_s) A_i = 0 \quad (2-19)$$

$$G = \frac{E_i(T_s)}{\alpha_i} \implies \frac{G}{E_b(T_s)} = \frac{1}{\alpha_i} \frac{E_i(T_s)}{E_b(T_s)} = 1 \quad (2-20)$$

Como esta equação vale para todo corpo  $i$  dentro da cavidade, encontra-se (8):

$$\frac{E_1(T_s)}{\alpha_1} = \frac{E_2(T_s)}{\alpha_2} = \dots = E_b(T_s) \quad (2-21)$$

Considerando a emissão hemisférica total, obtém-se (8):

$$\frac{\varepsilon_1}{\alpha_1} = \frac{\varepsilon_2}{\alpha_2} = \frac{\varepsilon_i}{\alpha_i} = \dots = 1 \quad (2-22)$$

Portanto, para qualquer superfície no interior desta cavidade, tem-se  $\varepsilon = \alpha$ , ou seja, a emissividade hemisférica total de cada corpo é igual a absorptividade hemisférica total.

### 2.1.4 Troca de Radiação entre Superfícies

Após a apresentação dos conceitos básicos relativos à radiação e sua propagação deve-se compreender a interação entre duas ou mais superfícies irradiantes. Essa interação depende das geometrias que caracterizam estas superfícies, de suas orientações, de suas propriedades radiativas e temperaturas. Inicialmente, considera-se a relação entre superfícies que estejam separadas por um meio não-participante, ou seja, não emissor ou não absorvedor de radiação. O conceito de fator de forma nos auxiliará na compreensão da troca radiativa entre estas superfícies. O fator de forma  $F_{ij}$  é definido como a fração de radiação saindo da superfície  $i$  que é interceptada pela superfície  $j$  (8).

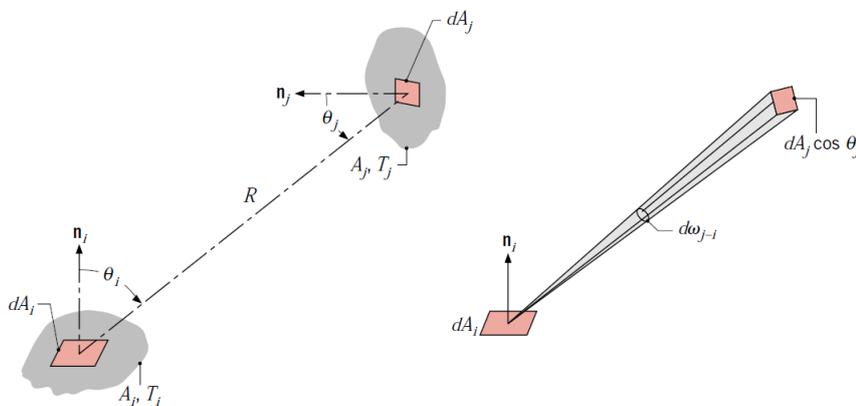


Figura 2.6: Fator de Forma associado a elementos de área  $dA_i$  e  $dA_j$  (8)

A partir do desenvolvimento em (8) o fator de forma pode ser encontrado por:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_i dA_j \quad (2-23)$$

Analogamente:

$$F_{ji} = \frac{1}{A_j} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (2-24)$$

Como as integrais são as mesmas em ambas as equações, pode-se relacionar  $F_{ij}$  e  $F_{ji}$  na chamada lei da reciprocidade (8):

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (2-25)$$

Outra relação importante é a entre fatores de forma num espaço fechado. A regra da soma pode ser aplicada para as  $N$  superfícies neste espaço e se baseia no fato de que toda a radiação saindo da superfície  $i$  deve ser absorvida por ela ou pelas outras superfícies (8):

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (2-26)$$

### 2.1.5 Transferência de Calor Multimodal

Até o momento foi considerada a troca de calor sob em um espaço fechado sob condições onde a convecção e condução eram negligenciáveis em comparação com a radiação. Entretanto, isso nem sempre é representativo dos casos reais, como o caso estudado nessa dissertação. A transferência de calor multimodal está representada na figura 2.7 (8).

Esta representação gráfica pode ser descrita equacionalmente como (8):

$$q_i = q_{i,rad} + q_{i,conv} + q_{i,cond} + q_{i,ext} \quad (2-27)$$

Onde  $q_i$  ( $W/m^2$ ) é a taxa de transferência de calor total,  $q_{i,rad}$  ( $W/m^2$ ) a taxa de transferência de calor radiativo,  $q_{i,conv}$  ( $W/m^2$ ) a taxa de transferência de calor convectivo,  $q_{i,cond}$  ( $W/m^2$ ) a taxa de transferência de calor por condução e  $q_{i,ext}$  ( $W/m^2$ ) taxa de transferência de calor de uma fonte externa.

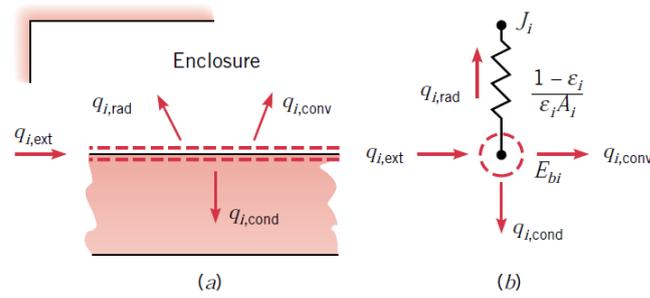


Figura 2.7: Transferência de calor multimodal de uma superfície numa cavidade. (a) Balanço energético da superfície. (b) Representação esquemática. (8)

## 2.2

### Troca de Calor no Espaço Anular

A transferência de calor ocorre por três modos distintos: condução, convecção e radiação. Com o objetivo de facilitar a modelagem do problema proposto o espaço anular foi vedado com teflon, um material tipicamente isolante. Com isso, pode-se desconsiderar os efeitos de condução de calor pelas tampas. Os tubos também foram dimensionados para que a dimensão longitudinal  $L$  ( $m$ ) seja muito maior que o diâmetro hidráulico do espaço anular  $D_h$  ( $m$ ). Este dimensionamento garante que os efeitos de borda sejam negligenciáveis e que as tampas não afetem a transferência de calor de forma significativa. Além disso, os materiais dos tubos possuem alta condutividade térmica, garantindo, assim, que as temperaturas das paredes internas e externas dos tubos deverão ser aproximadamente iguais no regime permanente de transferência de calor. Portanto, apenas a troca de calor radial no presente trabalho será levada em consideração (8).

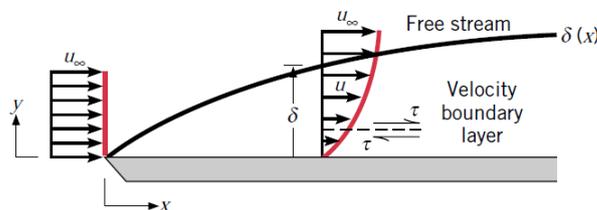


Figura 2.8: Camada limite hidrodinâmica numa superfície plana (8)

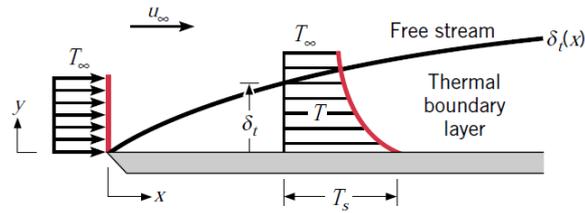


Figura 2.9: Camada limite térmica numa superfície plana isotérmica (8)

O processo de transferência de energia por convecção é descrito por dois mecanismos: o primeiro diz respeito a energia transferida devido ao movimento aleatório das moléculas (difusão) e o segundo relativo ao movimento global do fluido, seu movimento macroscópico (advecção). Uma consequência desta interação é a formação de uma região de gradiente de velocidade, onde esta é zero na parede e, a partir de uma distância limite, ela apresenta um valor constante que diz respeito ao movimento global do fluido. Esta região é conhecida como camada limite hidrodinâmica e pode ser observada na figura 2.8. Caso as temperaturas do fluido e da superfície sejam diferentes também haverá a formação de uma camada limite térmica, ou seja, próximo à superfície a temperatura do fluido é igual a da superfície e a partir de uma certa distância a temperatura é constante, uma representação deste fenômeno pode ser visto na figura 2.9. Próximo à parede o movimento macroscópico do fluido é quase nulo (na parede a velocidade é zero) então há uma predominância do movimento molecular nesta região (8).

A transferência de calor por convecção pode ser classificada pela natureza do escoamento do fluido. Quando o escoamento é causado por elementos externos, como por exemplo um ventilador, esta é categorizada como convecção forçada. Na convecção natural, no entanto, o elemento central de escoamento do fluido é o empuxo, ou seja, diferenças de densidade no fluido, por conta da diferença de temperatura, que forçam o movimento em uma direção (8).

### 2.2.1

#### Diminuição da Pressão e o Número de Knudsen

Ao diminuir-se a pressão, o efeito da convecção se torna cada vez menor, visto que há um afastamento maior entre as moléculas, logo o ideal seria criar semi-vácuo ou vácuo no espaço anular. Neste caso, há de se considerar o caminho livre médio entre as moléculas, ou seja, o percurso médio entre duas colisões consecutivas. Se este percurso for da mesma ordem de grandeza do comprimento característico (neste caso a distância entre os tubos), caracteriza-se um

regime onde as formulações clássicas da mecânica dos fluidos não descrevem de forma satisfatória o problema. O número adimensional característico desse fenômeno chama-se número de Knudsen e sua formulação é a seguinte (9):

$$Kn = \frac{\eta}{\gamma} \quad (2-28)$$

$$\eta = \frac{k_B T}{\sqrt{2\pi} \delta^2 P}$$

Onde,  $\eta$  ( $m$ ) é o percurso livre médio entre as moléculas,  $\gamma$  ( $m$ ) é o comprimento característico no qual ocorre a transferência de calor,  $k_B = 1,38 \times 10^{-23} J/K$  é a constante de Boltzmann,  $T$  ( $K$ ) a temperatura do fluido,  $\delta = 3,5 \times 10^{-10} m$  o diâmetro molecular do ar e  $P$  ( $Pa$ ) a pressão absoluta.

Quando o número de Knudsen é igual a 1, tem-se o caso descrito anteriormente e já não se pode aplicar as correlações da mecânica clássica. De acordo com Al-Kouz et al. (9) o ideal é que  $Kn \leq 0,01$ , para garantir que esteja-se trabalhando no regime contínuo. Como demonstrado pela equação (2-28), o percurso livre médio entre as moléculas é diretamente proporcional à temperatura e inversamente proporcional à pressão, os outros parâmetros são constantes dado o fluido de trabalho. Logo, o pior caso ocorrerá para a maior temperatura e menor pressão, ou seja, o maior  $\eta$ .

### 2.2.2

#### Determinação de Grandezas Auxiliares

Para o cálculo do calor de convecção e radiação, não basta possuir os valores de temperatura das paredes, também é necessária a utilização de diversas grandezas auxiliares, tais como: densidade, condutividade térmica, viscosidade dinâmica, coeficientes de troca de calor, etc. Algumas dessas grandezas podem ser estimadas de forma simples, como é o caso da densidade, outras no entanto requerem uma análise um pouco mais refinada, como verificado a seguir:

$$PV = mRT \quad \longrightarrow \quad \frac{m}{V} = \frac{P}{RT} \quad (2-29)$$

$$d_{ar} = \frac{P}{RT} \quad (2-30)$$

Onde  $V$  ( $m^3$ ) é o volume,  $m$  ( $kg$ ) a massa do gás,  $P$  ( $Pa$ ) a pressão

absoluta,  $T$  ( $K$ ) a temperatura absoluta e  $R = 8,31 J/mol \cdot K$  a constante universal dos gases ideais.

No caso do calor específico, tem-se uma forma simplificada (10):

$$c_p = 1050 - 0,365T + 0,00085T^2 - 0,00000039T^3 \quad (2-31)$$

$$c_v = c_p - R \quad (2-32)$$

Onde  $c_p$  ( $J/kg \cdot K$ ) é o calor específico à pressão constante e  $c_v$  ( $J/kg \cdot K$ ) o calor específico à volume constante. Já no caso da condutividade térmica e viscosidade dinâmica existem algumas dificuldades em definir estas grandezas diretamente como função da pressão e temperatura sem o auxílio de modelos. De acordo com (11), a condutividade pode ser encontrada através do seguinte modelo:

$$\begin{aligned} \mu &= \mu^0(T) + \mu^\tau(\tau, \Delta) \\ \tau &= \frac{T_c}{T} \quad ; \quad \Delta = \frac{\rho}{\rho_c} \end{aligned} \quad (2-33)$$

Onde  $T_c$  e  $\rho_c$  são, respectivamente, uma temperatura crítica e uma densidade crítica descritas em (11) e valem  $132,6 K$  e  $10,45 mol/dm^3$ .

$$\mu^0(T) = \frac{0,0266958\sqrt{MT}}{\sigma^2\Omega(T^*)} \quad (2-34)$$

Sendo  $M$  ( $kg/mol$ ) a massa molar do ar,  $T$  ( $K$ ) sua temperatura,  $\sigma$  ( $m$ ) o parâmetro de escala de Lennard-Jones e  $\Omega$  a integral de colisões dada por:

$$\Omega(T^*) = e^{f(T^*)} \quad ; \quad T^* = \frac{T}{\varepsilon/k}$$

$\varepsilon/k$  ( $K$ ) é o parâmetro de energia de Lennard-Jones e  $f(T^*)$  é:

$$f(T^*) = \sum_{i=0}^4 b_i [\ln(T^*)]^i$$

$$\mu^\tau(\tau, \Delta) = \sum_{i=1}^n N_i \tau^{t_i} \Delta^{d_i} \exp(-\gamma_i \Delta^{l_i}) \quad (2-35)$$

Os parâmetros  $b$ ,  $N$ ,  $d$ ,  $t$ ,  $l$ , são coeficientes de ajuste encontrados experimentalmente em (11) e podem ser encontrados nas tabelas da mesma referência. O modelo de condutividade térmica utiliza a equação 2-34, vista anteriormente, assim como algumas correlações derivadas de modelos experimentais:

$$k = k^0(T) + k^\tau(\tau, \Delta) + k^c(\tau, \Delta) \quad (2-36)$$

No presente estudo, trabalha-se com valores de temperatura de pelo menos 200 K de diferença da temperatura crítica, logo pode-se considerar  $k^c(\tau, \Delta) = 0$ , como descrito em (11). As outras duas parcelas são encontradas a partir das seguintes correlações:

$$k^0 = N_1 \left[ \frac{\mu^0(T)}{1 \mu Pa \cdot s} \right] + N_2 \tau^{t_2} + N_3 \tau^{t_3} \quad (2-37)$$

$$k^\tau = \sum_{i=4}^n N_i \tau^{t_i} \Delta^{d_i} \exp(-\gamma_i \Delta^{l_i}) \quad (2-38)$$

### 2.2.3 Radiação

No presente experimento, analisam-se corpos cinzas, para qual uma parte da radiação incidente é absorvida, outra refletiva e outra emitida. Portanto, é necessário o cálculo dos fatores de forma para o espaço anular assumindo duas hipóteses (a primeira considerando as tampas como isolantes e re-irradiantes e a segunda para cilindro infinito). Utilizando correlações encontradas na literatura (12), é possível determinar estes fatores de forma a partir da geometria do experimento, onde o índice 1 é referente ao cilindro interno, 2 ao cilindro externo e 3 as tampas:

$$F_{21} = \frac{1}{r} - \frac{1}{\pi r} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{B}{A} \right) - \frac{1}{2H} \left[ f_1 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{B}{rA} \right) + B \cdot \sin^{-1} \left( \frac{1}{r} \right) - \frac{\pi A}{2} \right] \right\} \quad (2-39)$$

$$F_{12} = \frac{A_2}{A_1} F_{21} \quad (2-40)$$

$$F_{22} = 1 - \frac{1}{r} + \frac{2}{\pi r} \tan^{-1} \left( \frac{2\sqrt{f_2}}{H} \right) - \frac{H}{2\pi r} \left[ f_3 \cdot \sin^{-1}(f_4) - \sin^{-1} \left( \frac{f_2 - 1}{r^2} \right) + \frac{\pi}{2} (f_3 - 1) \right] \quad (2-41)$$

$$r = \frac{r_2}{r_1} \quad ; \quad H = \frac{L}{r_1} \quad ; \quad A = H^2 + r^2 - 1 \quad ; \quad B = H^2 - r^2 + 1$$

$$f_1 = (A + 2)^2 - 4r^2 \quad ; \quad f_2 = r^2 - 1 \quad ; \quad f_3 = \frac{\sqrt{4r^2 + H^2}}{H}$$

$$f_4 = \frac{4f_2 + (H^2/r^2)(f_2 - 1)}{H^2 + 4f_2}$$

As dimensões utilizadas nas relações previamente apresentadas podem ser vistas na figura 2.10:

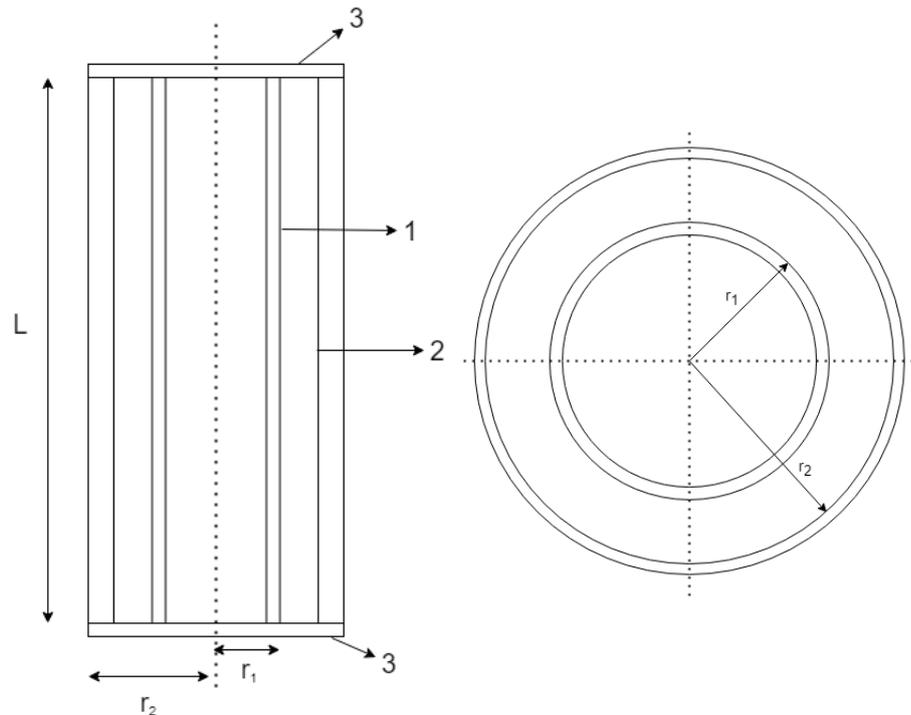


Figura 2.10: Representação esquemática do problema (elaboração própria)

Sabe-se que  $F_{11} = 0$ , pois trata-se de uma superfície convexa. Compreende-se também que a soma de todos os fatores de forma de uma única superfície é igual a 1, logo obtém-se todos os fatores de forma determinados a partir de:

$$F_{11} + F_{12} + F_{13} = 1$$

$$F_{13} = 1 - F_{12} \tag{2-42}$$

$$F_{21} + F_{22} + F_{23} = 1$$

$$F_{23} = 1 - F_{21} - F_{22} \tag{2-43}$$

De acordo com (13), a taxa de transferência de calor entre as superfícies no espaço anular é dada por:

$$Q_r = \frac{\sigma (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + R_{eq} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (2-44)$$

$$R_{eq} = \left[ \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3} \right]^{-1}$$

$$R_1 = \frac{1}{A_1 F_{13}} \quad ; \quad R_2 = \frac{1}{A_2 F_{23}} \quad ; \quad R_3 = \frac{1}{A_1 F_{12}}$$

Na qual  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  é a constante de Stephan Boltzman,  $\varepsilon_i$  a emissividade da superfície  $i$ ,  $A_i$  (m) a área da superfície  $i$  e  $R_{eq}$  a resistência equivalente.

Há de se considerar também o caso em que o comprimento do cilindro é muito maior que o diâmetro hidráulico, ou seja, a aplicação da correlação para cilindros infinitos. Neste caso, a equação para a taxa de transferência de calor de radiação é determinada por (8):

$$Q_r = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left( \frac{A_1}{A_2} \right)} \quad (2-45)$$

#### 2.2.4 Convecção Natural

Para o caso da convecção natural no espaço anular, pode-se utilizar as correlações de espaços confinados para o espaço anular (12):

$$Q_c = \frac{A_2 - A_1}{\ln \left( \frac{A_2}{A_1} \right)} h_c (T_2 - T_1) = h_c A_{lm} (T_2 - T_1) \quad (2-46)$$

Sendo  $h_c$  ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) o coeficiente de troca de calor por convecção e  $A_{lm}$  (m) a área logarítmica média. O coeficiente de troca de calor será encontrado a partir de correlações dependendo do número de Grashof (12):

$$Nu = 1 \quad \implies \quad Gr \leq 2000 \quad (2-47)$$

$$Nu = 0,18 \cdot Gr^{1/4} \left( \frac{D_h}{L} \right)^{1/9} \implies 2000 < Gr < 20000 \quad (2-48)$$

$$Nu = 0,065 \cdot Gr^{1/3} \left( \frac{D_h}{L} \right)^{1/9} \implies 20000 < Gr < 1,1 \times 10^7 \quad (2-49)$$

$$Gr = \frac{d_{ar}^2 g \beta \Delta T L^3}{\mu^2} \quad ; \quad \beta = \frac{1}{T_\infty} \quad (2-50)$$

$$Nu = h_c \frac{D_h}{k} \quad (2-51)$$

É necessário considerar os efeitos de borda devido as camadas limite térmica e hidrodinâmica. Caso a cavidade tenha dimensão muito reduzida, é possível que estes efeitos tenham grande influência na convecção natural, desta forma é importante que o comprimento dos tubos seja de maior ordem de grandeza que o diâmetro hidráulico. Com isto, o comprimento do tubo foi escolhido de forma a suavizar os efeitos de borda, através da correlação:  $L > 25(r_e - r_i)$ , determinada a partir de (14, 15).

$$D_h = \frac{4A}{P} = D_e - D_i = 2(r_e - r_i) \quad (2-52)$$

## 2.2.5

### Modelagem Multimodal do Problema

A partir das seções 2.1.5, 2.2.3 e 2.2.4, pode-se equacionar o caso proposto neste trabalho:

$$Q_t = Q_c + Q_{ri} \quad \text{ou} \quad Q_t = C_c \cdot \Delta_h T + C_{ri} \cdot \Delta T_4 \quad (2-53)$$

$$\Delta T_4 = (T_1^4 - T_2^4) \quad ; \quad \Delta_h T = h(T_1 - T_2)$$

$$C_c = A_{tm} \quad ; \quad C_{r1} = \frac{\sigma}{\left( \frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} \right) + R_{eq} + \left( \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2} \right)} \quad ; \quad C_{r2} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left( \frac{A_1}{A_2} \right)}$$

Onde  $Q_c$ ,  $Q_{r1}$  e  $Q_{r2}$  são respectivamente a taxa de transferência de calor devido à convecção natural, a radiação para a hipótese de cilindro finito e a

radiação para cilindros infinitos. As constantes  $C_c$ ,  $C_{r1}$  e  $C_{r2}$  serão utilizadas na parametrização dos pontos de medição para a formação de um plano descrito pela equação 2-53

A partir dos valores de emissividade em cada ponto, são estimadas as incertezas do cálculo pelo método de Kline e McClintock:

$$\delta\varepsilon_1^2 = \left(\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial A_1}\delta A_1\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial Q_r}\delta Q_r\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial T_i}\delta T_i\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial T_e}\delta T_e\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial R_{eq}}\delta R_{eq}\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial \varepsilon_2}\delta \varepsilon_2\right)^2 + \left(\frac{\partial\varepsilon_1}{\partial A_2}\delta A_2\right)^2 \quad (2-54)$$

### 2.3

#### Medições de Emissividade

Há hoje uma gama de metodologias para a medição de emissividade de uma superfície. Estas podem ser divididas entre dois grupos: medições indiretas de emissividade e medições diretas de emissividade. Os procedimentos indiretos envolvem a medição de alguma grandeza auxiliar como temperatura, refletividade ou transferência de calor e a partir destas estima-se a emissividade dependendo da modelagem abordada. Por outro lado, os métodos diretos aferem a emissividade a partir da emissão de ondas de infravermelho e da captação do padrão espectral retornado pelo corpo, com isso determinando a emissividade sem o auxílio de grandezas auxiliares.

O método *integrating spheres*, mostrado na figura 2.11, é um dos métodos mais comuns para a medição de emissividade de forma indireta. O mesmo consiste em medir a refletividade de um objeto a partir de um aparato e com isso estimar a emissividade pela relação de Kirchhoff. O corpo é colocado no interior de uma esfera oca com uma cobertura de alta refletividade, nesta esfera encontra-se um pequeno orifício que permite a entrada de ondas de luz e infravermelho. O corpo reflete as ondas emitidas em sua direção e essa reflexão é absorvida por um medidor posicionado internamente. A diferença entre energia emitida inicialmente e recebida pelo sensor resulta no cálculo da refletividade como constata-se em (16). Esta metodologia também permite a medição da transmissividade para corpos translúcidos ao colocar o corpo de prova no orifício de passagem das ondas de luz. Internamente, é colocado um padrão de refletividade, a partir do valor recebido pelo sensor pode-se estimar a transmissividade do material em questão.

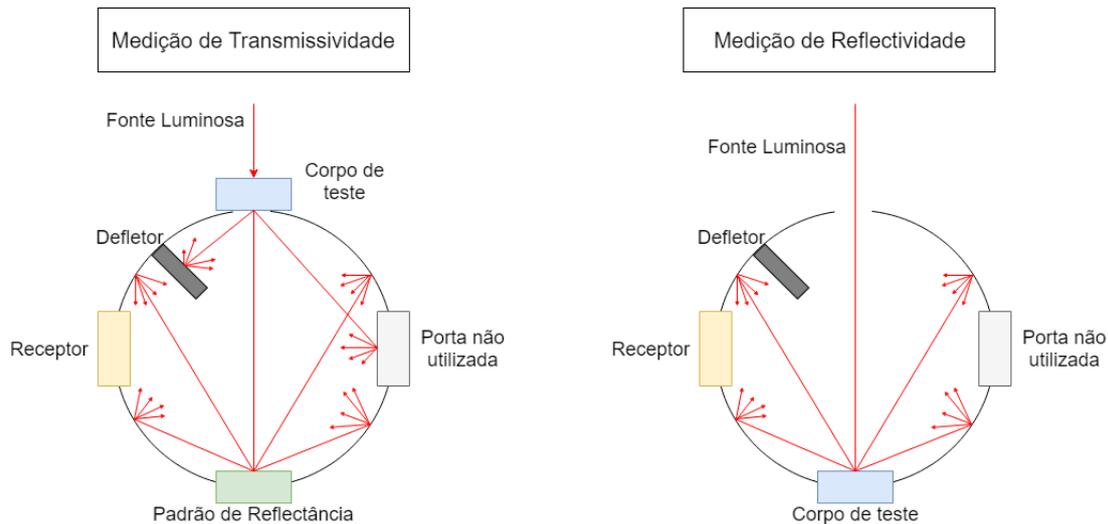


Figura 2.11: Funcionamento do Equipamento de *Integrating Spheres* (elaboração própria)

Outro método de medição indireta consiste na aferição dos fluxos de calor de radiação da superfície e, a partir de correlações encontradas na literatura pode-se estimar a emissividade do material. Como demonstrado em (17), é possível projetar um experimento em que o corpo é aquecido por resistência elétrica e o calor de radiação é recebido por uma termopilha, equipamento utilizado para transformar fluxos de calor em energia elétrica, desta forma é possível determinar o fluxo de calor por radiação. Outra possibilidade seria a medição de troca de calor entre superfícies, tal como um espaço anular com o tubo interno sendo aquecido por uma resistência elétrica (18). Ao elevar sua temperatura, um fluxo radiativo entre o tubo interno e o tubo externo é criado. É possível desconsiderar a condução caso a vedação térmica seja feita corretamente e com a utilização de uma bomba de vácuo no espaço anular pode-se reduzir a convecção natural. Medindo-se as temperaturas dos tubos interno e externo, estima-se o calor de radiação, visto que quantidade de calor proveniente da resistência elétrica é controlada. Com isso, encontra-se a emissividade da superfície em questão, um exemplo esquemático dessa configuração pode ser visto na figura 2.12.

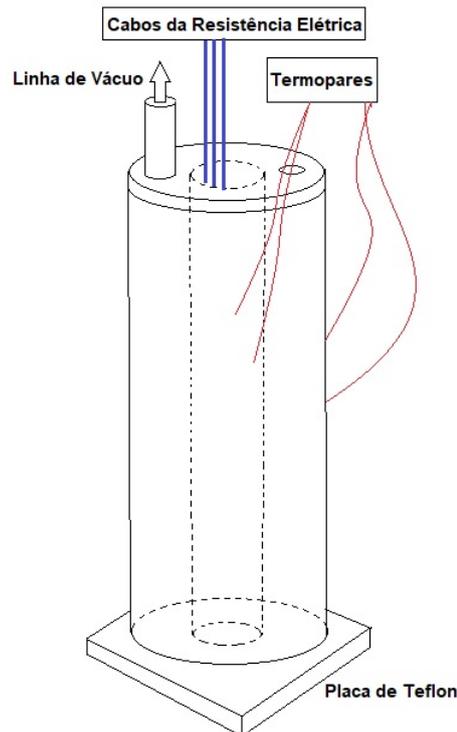


Figura 2.12: Modelo Esquemático de Medição da Emissividade no Espaço Anular (elaboração própria)

Além da medição dos fluxos de calor, também é possível estimar a emissividade a partir das medições de temperatura. A partir do apresentado em (19), pode-se aquecer um corpo numa câmara de vácuo até uma dada temperatura e registrar os valores de temperatura do corpo durante o resfriamento com o auxílio de termopares. A partir destes dados, utilizam-se correlações conhecidas para estimar a radiação dada a geometria e orientação do corpo e por fim estima-se a emissividade. A partir do demonstrado em (19), verifica-se que o erro de medição da emissividade nesses casos está altamente associado ao erro de medição de temperatura e da distância de medição da superfície emissora, sendo o caso ideal a medição diretamente na superfície.

Como dito anteriormente, as medições diretas de emissividade são realizadas com equipamentos capazes de mensurar o comportamento espectral da emissão radiativa das superfícies. Uma das formas mais comuns desse tipo de medição é com a utilização de termômetros de infravermelho. São equipamentos que utilizam uma emissividade padrão que pode ser ajustada para supor a temperatura do corpo a partir das leituras de infravermelho que leem. Com isso, o processo de estimativa da emissividade pode seguir de algumas formas. Como demonstrado em (20), pode-se determinar a emissividade com a utilização de um termômetro de infravermelho e termopares. Com o auxílio de uma fonte de calor aquece-se a superfície até que se chegue a

temperatura desejada, medida com a assistência do termopar. O termômetro infravermelho deve ser apontado para a superfície e a emissividade ajustada até que os valores de temperatura do termopar e do termômetro sejam iguais. Um exemplo desse procedimento pode ser visto na figura 2.13.

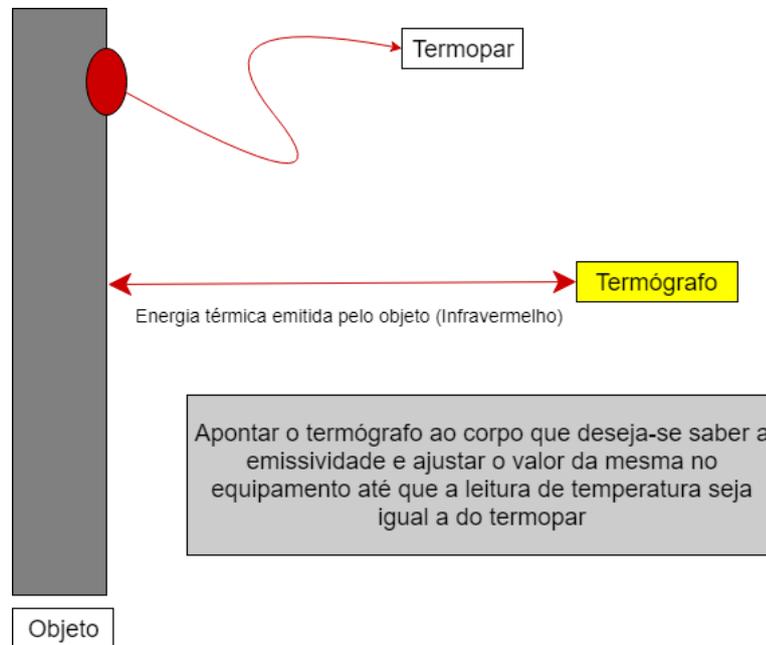


Figura 2.13: Medição de Emissividade com Termopar e Termômetro de Infravermelho (elaboração própria)

Outro protocolo experimental também comumente utilizado envolve a utilização de um corpo de emissividade conhecida, por exemplo um corpo negro. Um exemplo desse tipo de experimento pode ser visto em (21), onde a superfície desconhecida e a conhecida são colocadas num forno fechado e aquecidas até o equilíbrio térmico. O equipamento é inicialmente utilizado no corpo de emissividade conhecida e sua temperatura é determinada. Com isso, o equipamento é apontado para o corpo a ser estudado e a emissividade ajustada até que se encontre o mesmo valor de temperatura previamente determinado. É importante salientar como demonstrado em (21) que a rugosidade da superfície tem influência significativa nos valores de emissividade encontrados, assim como o nível de oxidação da mesma. Um exemplo esquemático desse modelo experimental pode ser visto na figura 2.14.

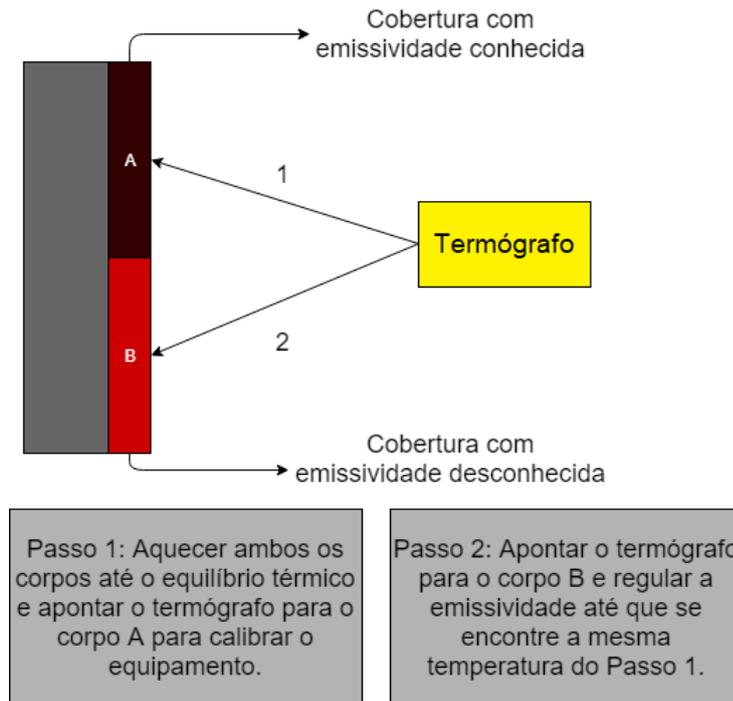


Figura 2.14: Medição de Emissividade com Cobertura e Termômetro de Infravermelho (elaboração própria)

Para alguns materiais, em especial os metais, há de se considerar alguns fatores como, por exemplo, a oxidação da superfície ao se realizar a medição da emissividade. Como os óxidos formados na superfície dos metais afetam diretamente na refletividade e, conseqüentemente, na emissividade em alguns casos serão necessários cuidados maiores nos procedimentos experimentais. Além disso quando utilizam-se câmeras termográficas ou termômetros de infravermelho é de extrema importância que a superfície de medição seja plana (22). Neste trabalho, foi realizada a medição da emissividade de superfícies planas e curvas para a aferição deste possível cenário.

Por fim, dentre os métodos diretos de medição da emissividade tem-se a radiometria. Este conjunto de técnicas envolve a aquisição e interpretação dos comportamentos da radiação eletromagnética, inclusive da luz visível. As metodologias de medição são variadas e as mesmas podem ser dispostas de diferentes maneiras como demonstrado em (23). Nestes procedimentos a medição de emissividade de um corpo é feita utilizando como base um material de alto poder emissivo, idealmente um corpo negro, e realizando a comparação de ambos para o mesmo padrão de emissão espectral. Essa comparação pode ser realizada de forma prévia, ou seja, utilizando o corpo negro para calibrar o equipamento e depois medindo a emissividade do corpo real, também é possível que a medição seja feita de forma simultânea, nestes casos a comparação é realizada em tempo real. Estes métodos são capazes de medir a emissividade

direcional ou hemisférica total do corpo, assim como a emissividade espectral de banda ou total. Além disso, os experimentos radiométricos possuem, em geral, um grande intervalo de temperaturas para as medições, podendo variar de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  à  $2700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Os elementos fundamentais para a realização destes procedimentos são um corpo negro (utilizado como base), uma ou mais fontes de radiação, um sistema de fixação das amostras e aquecimento, um sistema de medição de temperatura das superfícies, um sistema de detecção do padrão espectral e componentes ópticos (23).

As técnicas de radiometria podem ser classificadas em dois grupos, o primeiro refere-se às metodologias onde há a dispersão das ondas eletromagnéticas. Um exemplo pode ser visto em (24), onde é utilizado um monocromador para a separação da radiação em seus respectivos comprimentos de onda, que serão interceptados por um detector de infravermelho e analisados computacionalmente. É possível notar a dependência da emissividade com o comprimento de onda e para diferentes faixas de temperatura com uma alta precisão. Na figura 2.15 pode-se examinar os componentes principais de um sistema de radiometria por dispersão.

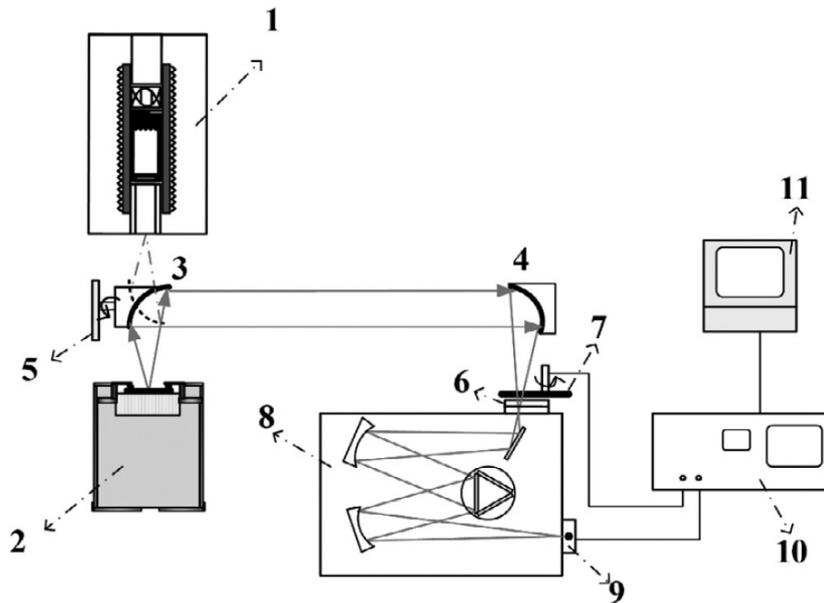


Figura 2.15: Exemplo de radiometria por dispersão. 1- Corpo negro, 2- Forno da amostra, 3 e 4- Espelhos parabólicos com cobertura de ouro, 5- Tabela de rotação motorizada, 6- Roda de filtro, 7- *Chopper* óptico, 8- Monocromador, 9- Detector, 10- Amplificador, 11- Sistema de captura de dados (24)

O segundo grupo de metodologias de radiometria envolve a espectroscopia no infravermelho. São emitidas diferentes frequências de radiação infravermelha e com o auxílio de um dispersor é possível analisar a diferença

entre os raios emitidos inicialmente e recebidos para cada frequência. Existe ainda um tipo específico de espectroscopia no infravermelho conhecido como IVTF (espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier). Este método é mais robusto que os anteriores e é aconselhável para medições mais precisas da emissividade. Diferentemente dos demais espectrômetros (citados anteriormente), todos os comprimentos de onda do infravermelho são enviados ao mesmo tempo e ao passar pelo interferômetro do aparelho formam o interferograma. Neste, é aplicada a transformada de Fourier retornando a resposta em frequência da entrada. Esse processo aumenta a velocidade do aparelho o que o torna mais eficiente que os demais. Um exemplo desse funcionamento está descrito na figura 2.16. Em todas as metodologias, a radiação do ambiente deve ser levada em conta e pode influenciar nos resultados finais, por isso é muito importante que o equipamento seja calibrado em função deste ruído. Para isso, geralmente, é utilizado um simulador de corpo negro para calibrar o espectrômetro (25). A figura 2.16 demonstra algumas montagens comuns para este tipo de metodologia como visto em (26) e (27).

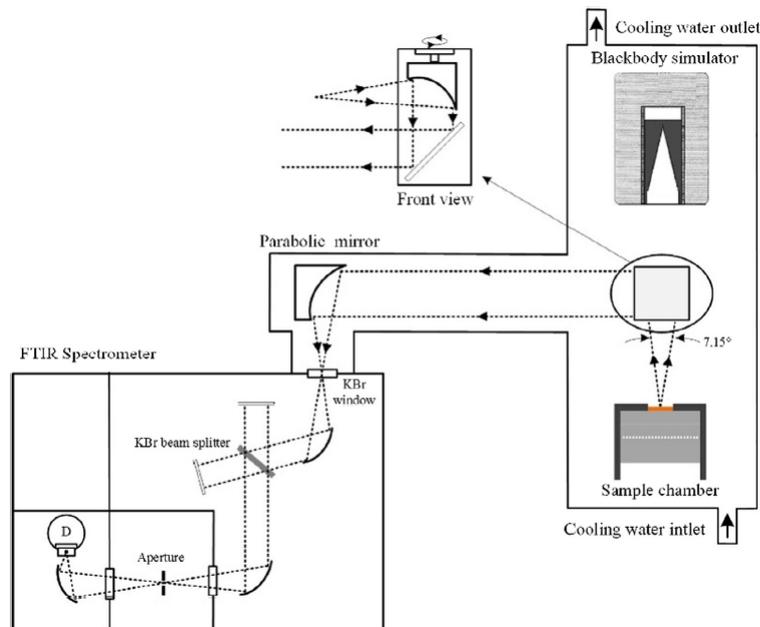


Figura 2.16: Medição de Emissividade com um Espectrômetro IVTF (26)

## 3

### Materiais e Métodos

A emissividade foi determinada a partir de dois experimentos e suas comparações. O primeiro experimento consistiu na aferição da emissividade a partir da medição indireta da troca de calor por radiação em um espaço anular, sendo o cilindro interno constituído do material a ser investigado. O segundo experimento foi baseado na medição direta de emissividade com a utilização de um termógrafo, placas planas revestidas com os materiais a serem investigados e os tubos utilizados no outro experimento..

Em cada experimento, foram medidas as emissividades de três superfícies: um cilindro de latão com cobertura de TSA, outro com cobertura de Jotatemp1000 e um cilindro de aço naval sem cobertura. O *Thermal Sprayed Aluminum* (TSA), assim como o Jotatemp1000 são compostos amplamente utilizados na cobertura de equipamentos navais, visto que promovem a proteção adequada para a alta oxidação presente em alto mar. Os cilindros de latão foram escolhidos para este experimento devido a sua alta condutividade térmica e o cilindro de aço em razão de sua ampla utilização nas plataformas *offshore*.

#### 3.1

#### Medição com Termógrafo

##### 3.1.1

##### Aparato Experimental

Para este experimento, foram utilizados os seguintes materiais:

1. Duas chapas de aço ASTM A36/SAE 1006/20 de dimensões  $20cm \times 20cm \times 1cm$
2. Dois termopares tipo K para as placas planas, projetados na oficina de eletrônica do LEV (PUC-Rio) com arame Omega
3. Tinta de cobertura Jotatemp 1000
4. Cobertura de TSA (*Thermal Sprayed Aluminum*)
5. Dois tubos de latão Fio Máquina 63/37 de 2" de diâmetro externo e 1/8" de espessura de parede.

6. Um tubo de aço ASTM A131M graus AH36 / DH36 / EH36 de 2” de diâmetro externo e 1/8” de espessura de parede.
7. Duas resistências elétricas modulares de cerâmica com potência de 1 kW, produzidas sob encomenda pela Ite Resistências
8. Nove termopares tipo K para os tubos (três em cada), projetados na oficina de eletrônica do LEV (PUC-Rio) com arame Omega
9. Controlador de temperatura, desenvolvido na oficina de eletrônica do LEV (PUC-Rio)
10. *Display* de medição de temperaturas, desenvolvido na oficina de eletrônica do LEV (PUC-Rio)
11. Termógrafo FLIR modelo A655sc; resolução de 640x480 pixels ; abrangência espectral de 7,5  $\mu m$  a 14,0  $\mu m$ .

A deposição da cobertura de TSA na placa plana e no tubo de latão ( $d_e = 2''$ ) foi executada pela empresa Sulcromo.

Os fornecedores do aço naval só realizam encomendas para placas de mais de 2  $m^2$ , por conta disso o teste na placa de aço naval se tornou inviável.

### 3.1.2 Metodologia Experimental

Para a medição da emissividade com o uso do termógrafo, foram preparadas 5 superfícies: uma placa de aço coberta com Jotatemp1000, uma placa de aço coberta com TSA, um tubo de latão coberto com Jotatemp1000, um tubo de latão coberto com TSA e um tubo de aço naval. Os tubos de TSA e Jotatemp1000 foram utilizados para comparação com as placas, permitindo a avaliação dos efeitos de curvatura na medição de emissividade, nas figuras 3.1 e 3.2 explicitam-se estes procedimentos.



Figura 3.1: Posicionamento da Câmera



Figura 3.2: Montagem do experimento realizada no laboratório de fotomecânica da PUC-Rio

As chapas tem dimensão de 40 *cm* por 40 *cm*, foram instrumentadas com termopares próximos ao seu centro e aquecidas com o uso de uma resistência elétrica de formato retangular. Os tubos 60 *cm* de comprimento com diâmetro externo de 2” com 1/8” de espessura de parede. Neles foram colocados três termopares distanciados de 100 *mm* entre si e com afastamento angular de 120°. Nesse caso, o único termopar utilizado para a medição foi o central, os outros dois foram utilizados para garantir a homogeneidade de temperatura na superfície.

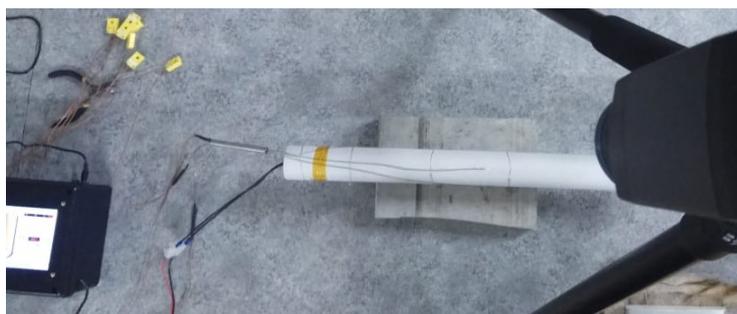


Figura 3.3: Posicionamento do Termógrafo

O termógrafo foi montado sobre uma mesa na qual as superfícies medidas foram colocadas, apresentado na figura 3.3. Para este experimento, foram escolhidas cinco temperaturas: 25 °C (Temperatura ambiente, utilizada como parâmetro de calibração), 50 °C, 100 °C, 150 °C e 200 °C. Estas temperaturas foram obtidas com o auxílio de um controlador e um *display* demonstrado na figura 3.4.



Figura 3.4: *Display* do Controlador de Temperatura

O termógrafo utiliza uma emissividade padrão para determinar a temperatura da superfície baseado nos comprimentos de onda que recebe. Ao aferir-se a temperatura real com o termopar, pode-se fazer o caminho inverso e inserir no termógrafo a temperatura, encontrando, assim, a emissividade real, como demonstrado na figura 3.5.

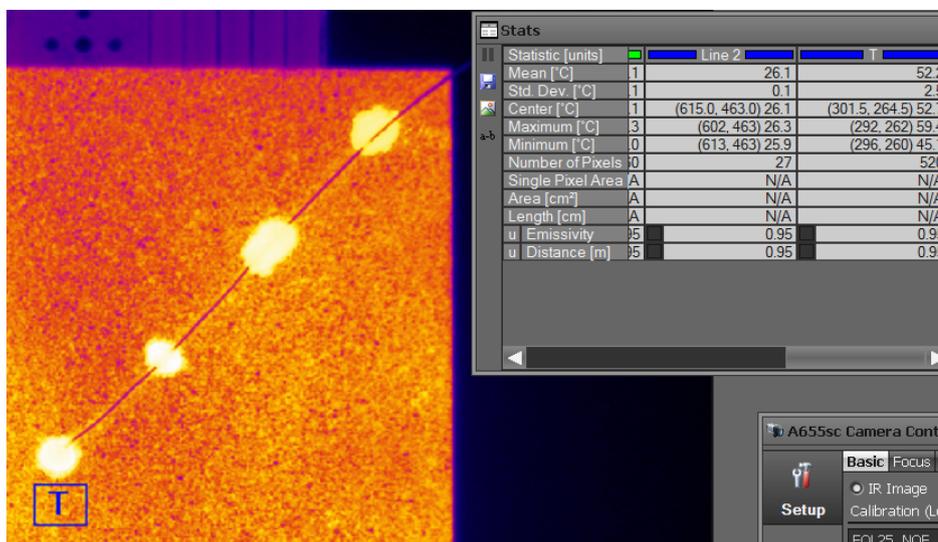


Figura 3.5: Programa Utilizado para Medição da Emissividade

O procedimento experimental com termógrafo obedeceu os seguintes passos:

1. Realiza-se a calibração do equipamento para a temperatura ambiente com um material de emissividade conhecida, um corpo negro por exemplo.
2. A superfície a ser medida é posicionada sobre a mesa abaixo do termógrafo.
3. No *display*, deve ser selecionada a temperatura desejada e deve-se aguardar até que o controlador mantenha o equilíbrio térmico.
4. Com o termógrafo apontado para a superfície (próximo ao termopar) deve-se ajustar a temperatura real, obtida pelo termopar, para que o termógrafo calcule a emissividade correspondente.
5. Repetir os passos 3 e 4 até a obtenção das medidas de emissividade relativas as temperaturas de: 25 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C e 200 °C
6. Fazer todo o procedimento para as cinco superfícies.

## 3.2

### Medição em Espaço Anular

#### 3.2.1

##### Aparato Experimental

- Dois tubos de latão Fio Máquina 63/37 de 2" de diâmetro externo e 1/8" de espessura de parede.
- Um tubo de aço ASTM A131M graus AH36 / DH36 / EH36 de 2" de diâmetro externo e 1/8" de espessura de parede.
- Um tubo de latão Fio Máquina 63/37 de 4" de diâmetro externo e 1/8" de espessura de parede.
- Duas resistências elétricas modulares de cerâmica com potência de 1 kW, produzidas sob encomenda pela Ite Resistências
- Duas chapas de teflon
- O'rings para os tubos internos - VITON com  $d = 1\frac{7}{8}$ " ;  $e = 2,5\text{ mm}$
- O'rings para o tubo externo - VITON com  $d = 3\frac{7}{8}$ " ;  $e = 2,5\text{ mm}$
- O'rings de vedação - VITON com  $d = 9,5\text{ mm}$  ;  $e = 4\text{ mm}$
- Duas chapas de aço
- Quatro parafusos
- Doze termopares tipo K, projetados na oficina de eletrônica do LEV (PUC-Rio) com arame Omega
- Tinta de cobertura Jotatemp 1000
- Cobertura de TSA (*Thermal Spray Aluminum*)
- Controlador de potência LOTI - Modelo MPCAFF
- *Display* de medição de temperaturas, desenvolvido na oficina de eletrônica do LEV (PUC-Rio)
- Transdutor de Pressão Honeywell - Modelo FPA
- Bomba de vácuo Quimis - Modelo Q-355B

Como mencionado na seção 2.2, os efeitos de borda devem ser considerados. Como demonstrado em (14) para valores de  $L/(r_e - r_i) > 8$  os efeitos de borda na troca de calor por convecção são praticamente desprezíveis para materiais com baixa porosidade. Como demonstrado em (15) é interessante que se trabalhe com valores de  $L/(r_e - r_i)$  mais altos, para não ocorrer troca de regime de transferência de calor devido ao aumento do número de Rayleigh. No presente trabalho foi escolhida a correlação de  $L > 25(r_e - r_i)$ :

$$r_e - r_i = 22,23 \text{ mm}$$

$$L_{min} = 555,75 \text{ mm}$$

Foi definido um valor de 600 mm para o comprimento dos tubos para ficar acima desse valor mínimo proposto, garantindo que os efeitos axiais devem ser menores que os efeitos radiais. Encontram-se na tabela 3.1, as dimensões do aparato experimental e a emissividade do latão. Essas grandezas estão empregadas na modelagem teórica apresentada na seção anterior.

Tabela 3.1: Medidas Características do Experimento

Legenda	Valor	Significado
$t$	3,17 mm	Espessura das paredes dos tubos
$d_e$	0,0508 m	Diâmetro externo do tubo interno
$D_i$	0,09526 m	Diâmetro interno do tubo externo
$D_h$	0,04446 m	Diâmetro hidráulico
$L$	0,6 m	Comprimento dos tubos
$A_1$	0,0958 m <sup>2</sup>	Área da superfície 1
$A_2$	0,1796 m <sup>2</sup>	Área da superfície 2
$A_{lm}$	0,1333 m <sup>2</sup>	Área logarítmica média
$R_{eq}$	10,51 m <sup>-2</sup>	Resistência equivalente
$\varepsilon_2$	0,60	Emissividade da superfície de latão (28)

### 3.2.2 Metodologia Experimental

Para a medição da emissividade das superfícies desejadas, foi elaborado um experimento baseado na transferência de calor num espaço anular, ou seja, uma medição indireta da emissividade.

Como mostrado na tabela 3.1, foram selecionados quatro tubos com espessura de parede  $1/8''$ . O tubo externo ( $D_e = 4''$ ) é feito de latão e é fixo no experimento. Os outros três tubos internos ( $d_e = 2''$ ) são feitos dos seguintes materiais: tubo de latão com cobertura de TSA (*Thermal Spray Aluminum*), tubo de latão com cobertura de Jotatemp 1000 e tubo de aço naval (superfície crua). Os tubos internos foram aquecidos utilizando resistências de cerâmica modulares de formato cilíndrico como mostra a figura 3.6



Figura 3.6: Resistência de cerâmica modular usada no aquecimento do tubo interno

Os tubos internos foram instrumentados com termopares na superfície externa (onde está a cobertura) para a medição da temperatura da mesma. Os termopares foram dispostos a uma distância de  $100\text{ mm}$  entre si, com o termopar central no localizado no centro do tubo. Além disso, os termopares foram separados de um ângulo de  $120^\circ$  entre si para que se garantisse a distribuição homogênea de temperaturas por todo o tubo.



Figura 3.7: Posicionamento dos tubos e espaço anular

No tubo externo, foram feitos pequenos furos (não passantes) na superfície externa e os termopares colocados a uma certa profundidade que permita a medição de temperatura das paredes internas deste tubo. Os termopares foram colocados com um distanciamento idêntico ao dos tubos internos, de  $100\text{ mm}$  na direção axial do tubo, sendo o termopar central colocado na posição central do tubo. Como o tubo tem  $600\text{ mm}$  o posicionamento dos termopares é:  $200\text{ mm}$  ( $T_1$ ),  $300\text{ mm}$  ( $T_2$ ),  $400\text{ mm}$  ( $T_3$ ). Também foram espaçados de um ângulo de  $120^\circ$ , ou seja:  $\theta_1 = 0^\circ$ ,  $\theta_2 = 120^\circ$ ,  $\theta_3 = 240^\circ$ .

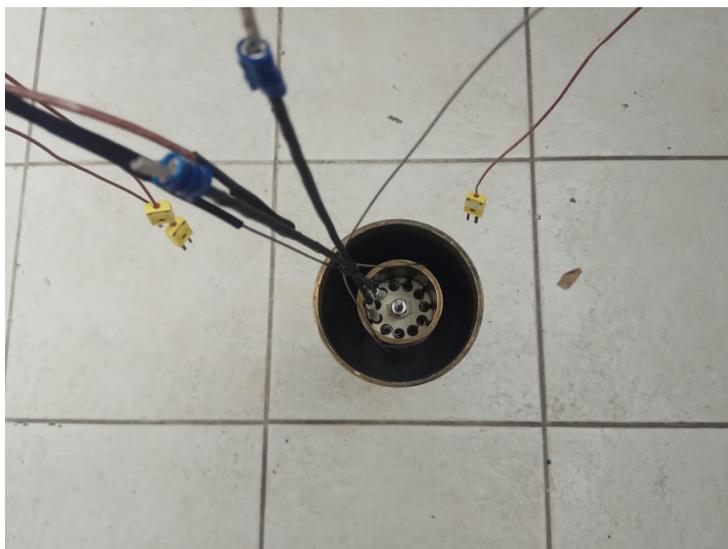


Figura 3.8: Vista superior do espaço anular

Para reduzir a condução pelas tampas, foi escolhido o teflon como material isolante e duas chapas do mesmo foram usinadas com ranhuras correspondentes aos diâmetros dos tubos interno ( $d_e = 2''$ ) e externo ( $D_e = 4''$ ). Além disso, a tampa superior foi furada em duas posições diametralmente opostas, em um destes furos passará um pequeno tubo de metal com os fios dos termopares internos e vedado com epóxi como apresentado na figura 3.9. O outro furo possui uma rosca na qual a bomba de vácuo foi acoplada.



Figura 3.9: Vedação do Aparato Experimental

Para cada material, segue-se o mesmo procedimento de montagem do equipamento:

1. Um dos tubos internos é selecionado para que seja determinada a emissividade do material de sua cobertura.
2. A resistência de cerâmica é encaixada no tubo interno escolhido.
3. São inseridos os *o-rings* nas ranhuras das placas de teflon para a vedação correta do equipamento durante o processo de diminuição da pressão.
4. Encaixam-se o tubo externo e o tubo interno nas ranhuras das tampas de teflon, passando o tubo de metal dos termopares pelo furo da tampa.
5. Em seguida são posicionadas as duas placas de aço por fora das tampas de teflon.

6. São passados os parafusos pelos furos nas chapas de aço e nas placas de teflon e apertados com porcas para que a vedação seja garantida.
7. Conectam-se os termopares no *display* de controle de potência.
8. Acopla-se a bomba de vácuo no segundo furo da placa de teflon com a ajuda de um espigão e em paralelo com um transdutor de pressão. É realizado um teste para garantir que não há vazamentos nesta etapa.

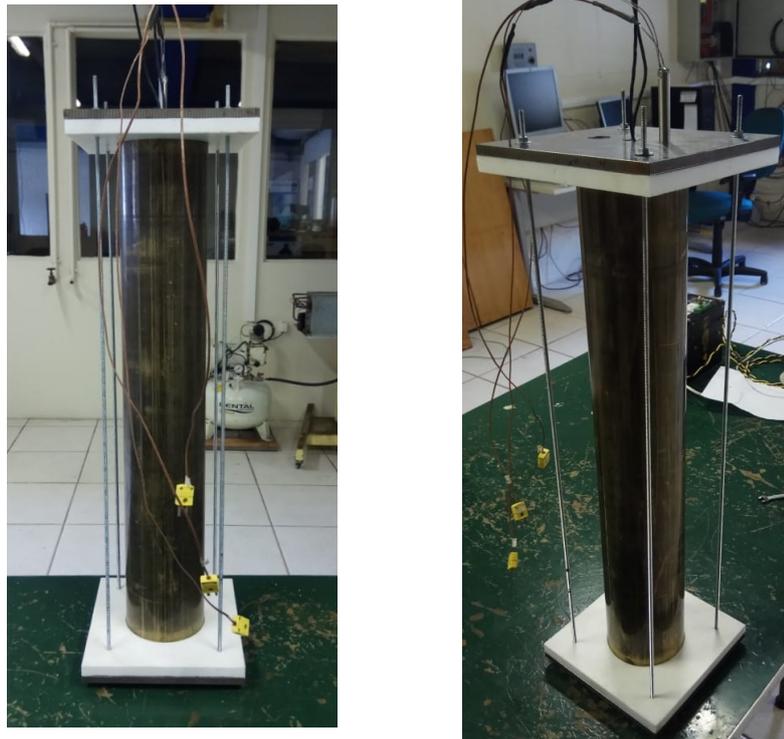


Figura 3.10: Aparato do Experimento de Medição de Emissividade no Espaço Anular (elaboração própria)

O Número de Knudsen apresentado na seção 2.2.1, deve ser aferido para a garantia do regime de continuidade do experimento. Para garantir que os efeitos de condução não sobrepõem os de convecção natural ( $Kn < 0,01$ ), considera-se o caso mais crítico. A partir da equação 2-28, nota-se que isto ocorrerá quando a maior temperatura e menor pressão forem alcançadas, visto que os outros parâmetros são constantes. A máxima temperatura esperada no experimento foi de  $573\text{ K}$  e a menor pressão  $0,1\text{ atm}$ . Para estes valores obtém-se:

$$Kn = \frac{1,381 \times 10^{-23} \cdot 673}{10132,5 \cdot (3,5 \times 10^{-10})^2 \cdot \pi \sqrt{2} \cdot (0,04763 - 0,0254)} \approx 5,2 \times 10^{-5}$$

O valor encontrado está muito abaixo do limite do regime de continuidade mesmo no caso mais extremo, logo não há preocupações quanto aos efeitos de condução no fluido.

Com o equipamento montado, podem-se realizar as medições de temperatura interna e externa para diferentes potências na resistência interna. A análise dos efeitos de convecção foi feita a partir da repetição do experimento para três pressões distintas:  $1 \text{ atm}$ ,  $0,5 \text{ atm}$  e  $0,1 \text{ atm}$ . Para cada pressão, serão utilizadas quatro potências como base para o aquecimento do tubo interno:  $15 \text{ W}$ ,  $30 \text{ W}$ ,  $45 \text{ W}$  e  $60 \text{ W}$ . Para este procedimento, o controle de temperatura não é almejado, pois deseja-se saber as temperaturas de estabilidade a partir de uma potência dada. Por isso, utiliza-se um controlador de potência e o *display* de temperaturas é apenas usado para leitura. Neste experimento, diferentemente do termógrafo, as 3 temperaturas são consideradas e trabalha-se com a média das mesmas, tanto para o tubo interno quanto para o externo. Com isso, é possível montar um mapa do comportamento experimental da radiação e convecção natural no espaço anular para cada material.

Com o aumento da temperatura do tubo interno, ocorre a transferência de calor para o tubo externo por convecção natural e radiação. Ao alcançar o regime permanente, tem-se as temperaturas de equilíbrio da parte externa do cilindro interno e da parte interna do cilindro externo. Utilizando as equações e correlações apresentadas na seção 2.2, é possível encontrar todas as grandezas auxiliares necessárias, como por exemplo: densidade, condutividade térmica, viscosidade dinâmica, etc. A partir disso, calculam-se os adimensionais relevantes ( $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$ ) e com isso, estima-se a convecção natural no espaço anular e a radiação dos corpos cinzas envolvidos. Por fim, estimam-se os coeficientes de troca de calor e conseqüentemente o calor transferido. O procedimento experimental ocorre da seguinte forma:

1. Determina-se em qual regime de pressão será realizada a medição.
2. Caso necessário, a bomba de vácuo é acionada para alcançar a pressão determinada (no caso de  $P = 1 \text{ atm}$  não há necessidade) e mantida com o auxílio de uma válvula.
3. Liga-se a resistência de cerâmica em uma das potências previamente apresentadas e aguarda-se até o equilíbrio térmico.
4. Anotam-se os resultados apresentados no *display* para as três temperaturas externas e internas.

5. Os procedimentos 3 e 4 devem ser repetidos para cada potência até que se obtenham pelo menos 3 medições em cada regime de potência.
6. Com os resultados, elabora-se uma tabela com todas as grandezas relevantes a partir das correlações apresentadas na seção 2.2.
7. A partir disso, é possível estimar a convecção natural e, conseqüentemente, a radiação.
8. Usando estes resultados, é possível estimar a emissividade a partir de dois cálculos:
  - Calculando a emissividade ponto a ponto com os valores da radiação utilizando a equação 2-44.
  - Utilizando o comando *fit* do *matlab* para a interpolação dos pontos em um plano como demonstrado na equação 2-53.

A partir das dimensões do experimento e das incertezas relativas a cada grandeza, pode-se calcular, com o auxílio da equação 2-54, a incerteza das grandezas a serem trabalhadas, como apresentadas na tabela 3.2:

Tabela 3.2: Tabela de Incertezas das Grandezas

$\delta A_1$	$\delta A_2$	$\delta Q_r$	$\delta T_1$	$\delta T_2$	$\delta R_{eq}$	$\delta \varepsilon_2$
0,002	0,002	1	0,5	0,5	0,001	0,1

## 4

### Resultados e Discussão

#### 4.1

##### Medição com Termógrafo

Após a realização dos passos descritos no item anterior, foram encontrados os valores de emissividade para os três materiais, apresentados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3:

	TSA									
	Placa					Tubo				
$T$ ( $^{\circ}C$ )	26	53	100	150	200	25	50	100	150	200
$\varepsilon$	0,839	0,463	0,405	0,396	0,390	1,000	0,450	0,294	0,279	0,276

Tabela 4.1: Emissividade da Placa e Tubo com cobertura de TSA

	Jotatemp 1000									
	Placa					Tubo				
$T$ ( $^{\circ}C$ )	25,5	50	102	150	200	28	50	100	152	193
$\varepsilon$	0,742	0,963	0,927	0,956	0,961	0,640	0,882	0,871	0,867	0,877

Tabela 4.2: Emissividade da Placa e Tubo com cobertura de Jotatemp 1000

	Tubo de Aço				
$T$ ( $^{\circ}C$ )	28,5	51	100	150	200
$\varepsilon$	0,611	0,643	0,700	0,716	0,750

Tabela 4.3: Emissividade do Tubo de Aço

A incerteza associada ao termógrafo está diretamente relacionada com a incerteza na medição de temperatura, pois a emissividade é encontrada a partir da temperatura que se coloca no termógrafo. A temperatura tem incerteza de  $\delta T = \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , o que gera uma incerteza na emissividade de aproximadamente  $\delta \varepsilon = \pm 0,030$  para todos os valores calculados. É importante notar também que os valores de medição do termógrafo tanto na placa quanto no tubo à temperatura ambiente não são representativos dos valores reais de emissividade. Isso ocorre, pois os termopares possuem uma incerteza muito grande em medições próximas a temperatura ambiente. Como o termógrafo necessita de uma entrada de temperatura para calcular a emissividade, estes valores acabam variando muito em relação aos outros.

Como pode ser observado nas tabelas 4.1 e 4.2, os valores de emissividade foram diferentes para a placa e o tubo. Este fato ocorre, provavelmente, pelo fator de forma não ser desprezível no caso do tubo e a curvatura do mesmo pode causar uma reflexão dos raios em direções fora do campo de leitura do termógrafo. Desta forma, a quantidade de radiação recebida de volta pelo equipamento foi menor, dando a impressão de uma emissividade mais baixa do que no caso da placa plana. No caso do TSA os valores de emissividade medidos no tubo foram em torno de 70% dos na placa. Já no caso do Jotatemp as medições no tubo representaram 90% os valores obtidos na placa. O acabamento pode ter sido um fator importante nessa diferenciação entre o TSA e o Jotatemp.

Além disso nas tabelas 4.2 e 4.3, os valores de emissividade crescem com a temperatura, o que está condizente com o comportamento esperado destes materiais como mostrado na figura 2.4. No caso do TSA, ocorre o oposto, observa-se uma queda da emissividade em função do crescimento da temperatura. Isto também está condizente com a literatura, visto que algumas superfícies de alumínio apresentam diminuição de emissividade com o aumento da temperatura, também mostrado na figura 2.4.

## 4.2

### Medição em Espaço Anular

#### 4.2.1

#### Hipótese das Tampas Re-irradiantes

##### 4.2.1.1

##### Superfície de TSA

Após a medição de todos os regimes de pressão e potência, foram encontrados valores de emissividade e sua incerteza associada ponto a ponto, como demonstrado nas tabelas presentes no anexo deste trabalho. A tabela 4.4 representa a média de emissividade destas tabelas anexadas.

Pressão	$\varepsilon_{TSA}$	$\delta\varepsilon_{TSA}$
1 atm	0,257	0,030
0,5 atm	0,260	0,026
0,03 atm	0,375	0,039

Tabela 4.4: Emissividade média relativo às tabelas 6.1, 6.2 e 6.3

Os valores individuais encontrados da emissividade para cada regime de pressão estão representados nas figuras 4.1, 4.3 e 4.5. Após o tratamento de dados obtém-se as médias dos intervalos de potência, como demonstrado nas figuras 4.2, 4.4 e 4.6.

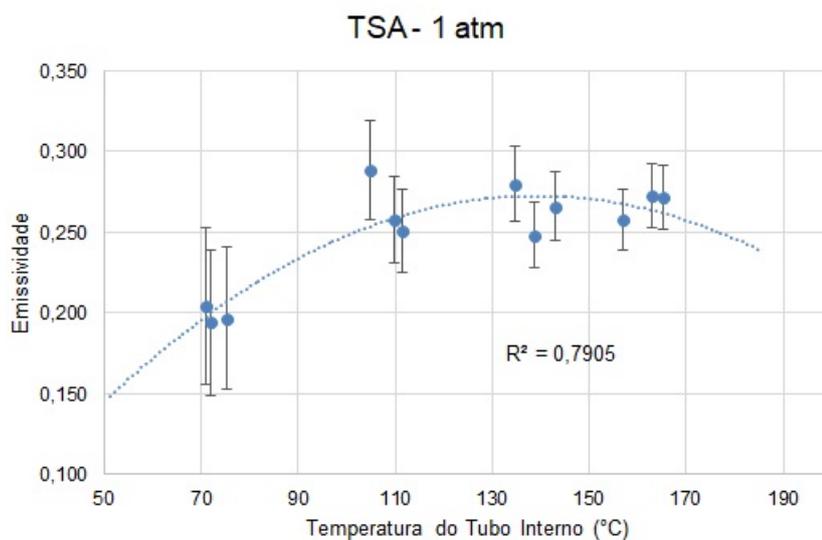


Figura 4.1: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

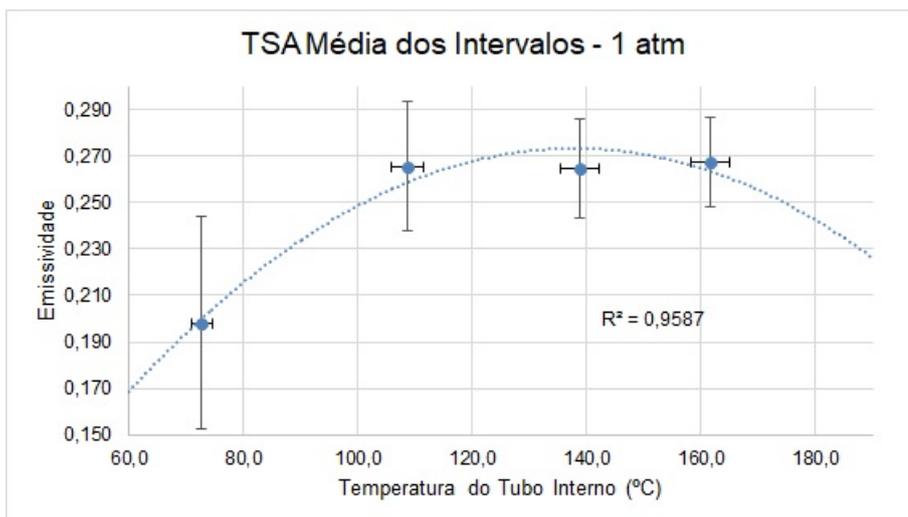


Figura 4.2: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

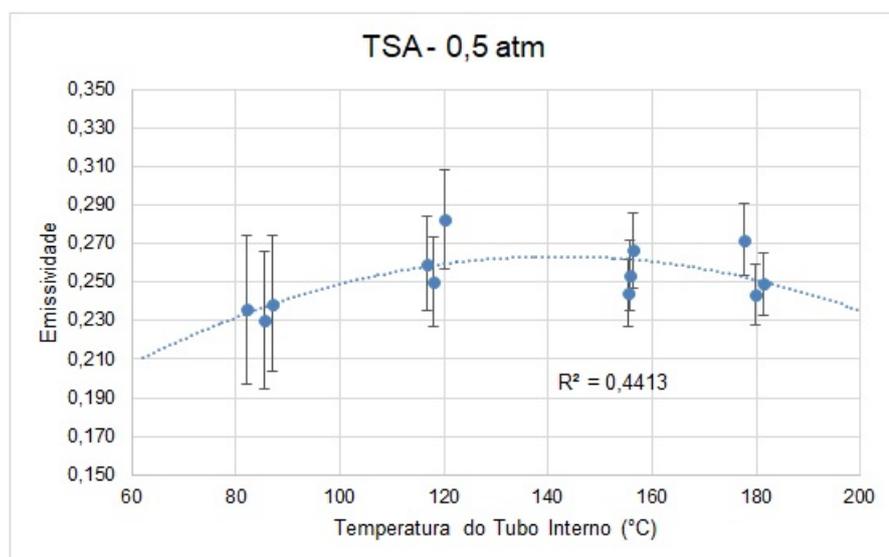


Figura 4.3: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

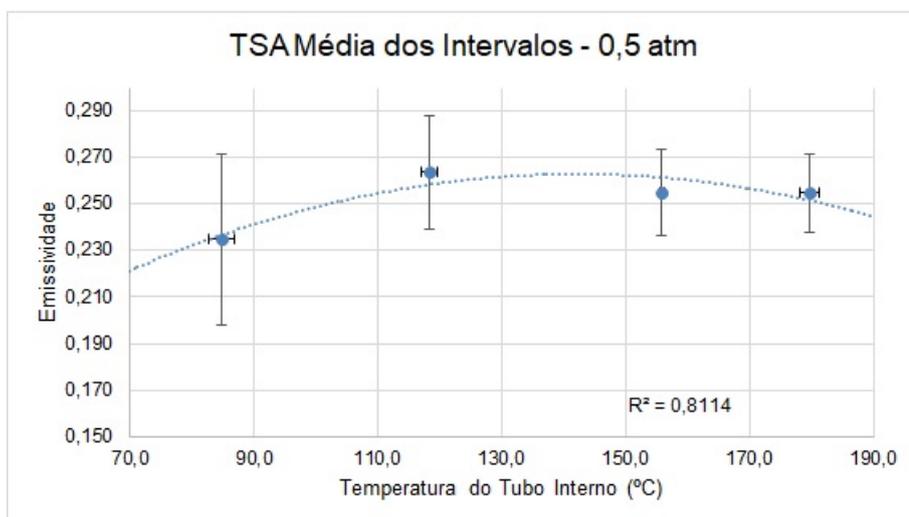


Figura 4.4: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

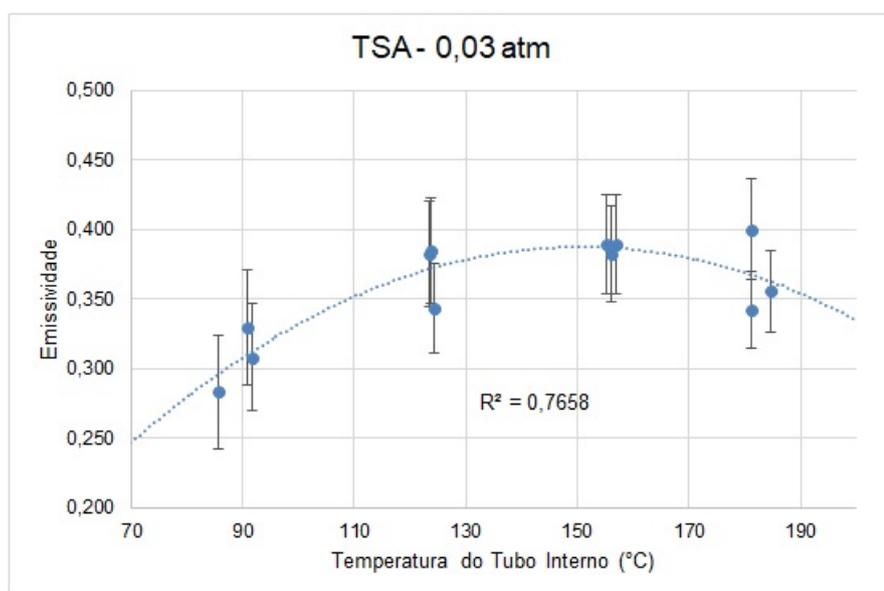


Figura 4.5: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

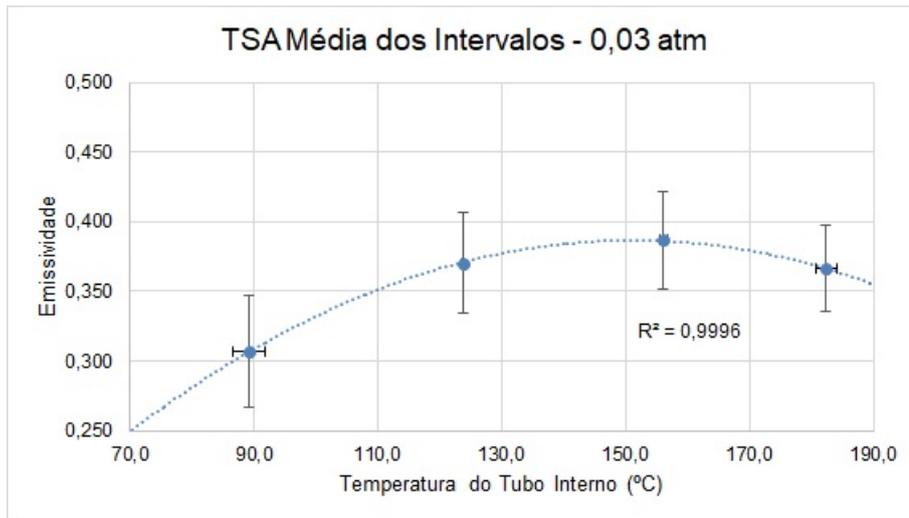


Figura 4.6: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

Como pode-se aferir nas figuras 4.1, 4.3 e 4.5, os valores de emissividade tiveram uma variação pequena para cada pressão. As diferenças se tornam mais significativas quando há a diminuição da pressão em cada experimento. Isso se dá provavelmente, por tratar de uma medida indireta da emissividade, altamente dependente dos valores estimados do calor de convecção. Também era esperado que nos valores mais baixos de temperatura houvessem maiores variações e efeitos negativos na medição do termopar, o que explica a pequena diferença entre os valores de temperatura nas baixas potências com as de alta potência. A partir das médias encontradas nestas tabelas, fica também claro que a incerteza das medições ficou em torno de 10% do valor da emissividade.

Após alguns testes, constatou-se que o modelo mais representativo das medidas seria um modelo polinomial de ordem 2, como observa-se nas figuras 4.1, 4.3 e 4.5. Apesar disso, o  $R^2$  ainda possuía valores baixos, calculando-se a média entre os três pontos próximos obtém-se quatro pontos representando as potências de 15W, 30W, 45W e 60W. Isso gera uma incerteza maior no eixo horizontal porém aumenta o  $R^2$  de forma significativa, como apresentado nas figuras 4.2, 4.4 e 4.6. As incertezas relativas a emissividade ainda são muito maiores proporcionalmente do que as de temperatura. Também é possível observar que para as temperaturas acima de 100 °C, a emissividade tem um comportamento quase constante.

A partir dos dados das tabelas 6.1, 6.2, 6.3, assume-se como modelagem da troca de calor a equação 2-53, supondo que a emissividade é constante ou próximo disso no intervalo observado. Chega-se então a seguinte superfície de resposta com o *matlab*:

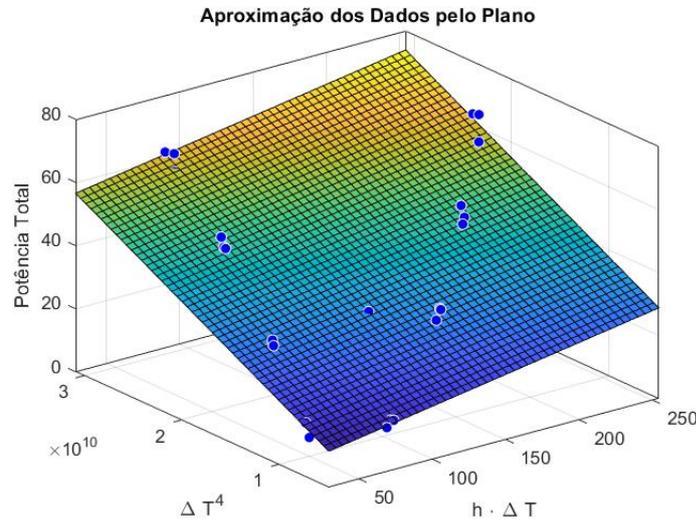


Figura 4.7: Representação da equação 2-53 para o TSA (Tampas Re-irradiantes)

O valor encontrado pelo *matlab* para a constante  $C_2$  e  $R^2$  foi de:

$$C_2 = (1,730 \pm 0,136) \times 10^{-9}$$

$$\varepsilon_{TSA} = 0,404 \pm 0,054$$

$$R^2 = 0,9764$$

O desvio padrão associado a constante  $C_2$  foi da ordem de 8% e o valor de emissividade encontrado com esta constante esta de acordo com o da tabela 4.1. O *fit* apresentou um  $R^2$  maior que pela aproximação quadrática nas figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6. Além disso o valor de emissividade encontrado neste método é maior que os descritos na tabela 4.4 e mais próximo do medido no experimento do termógrafo. Desta forma esta metodologia apresenta um resultado mais confiável.

### 4.2.1.2 Superfície de Jotatemp1000

Assim como o realizado para o TSA, foram encontrados valores de emissividade e sua incerteza associada ponto a ponto, como demonstrado nas tabelas presentes no anexo deste trabalho. A tabela 4.5 representa a média de emissividade destas tabelas anexadas.

Pressão	$\varepsilon_{Jot}$	$\delta\varepsilon_{Jot}$
1 atm	0,421	0,056
0,5 atm	0,463	0,058
0,03 atm	0,589	0,085

Tabela 4.5: Emissividade média relativo às tabelas 6.7, 6.8 e 6.9

Os valores individuais encontrados da emissividade para cada regime de pressão estão representados nas figuras 4.8, 4.10 e 4.12. Após o tratamento de dados obtém-se as médias dos intervalos de potência, como demonstrado nas figuras 4.9, 4.11 e 4.13.

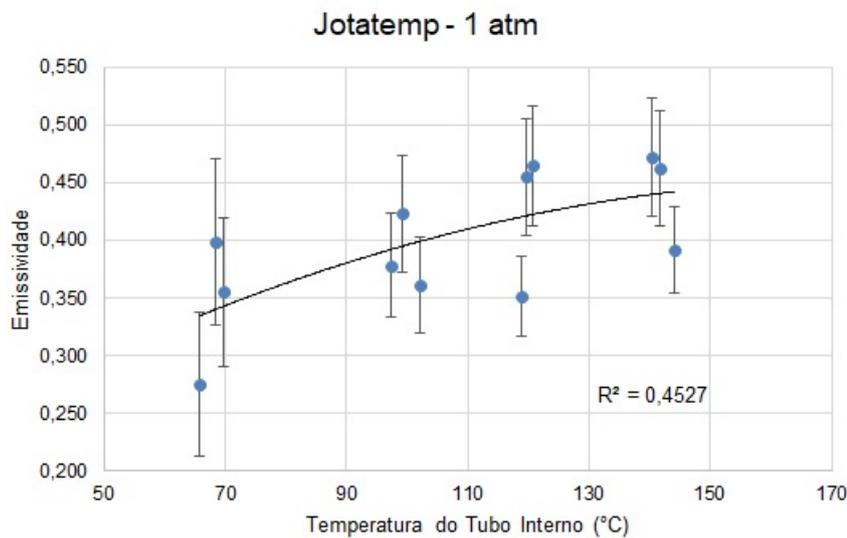


Figura 4.8: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

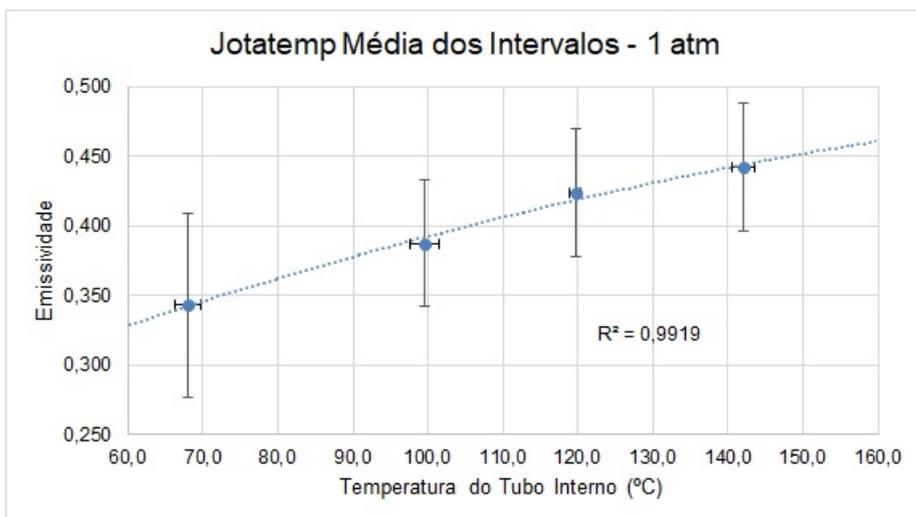


Figura 4.9: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

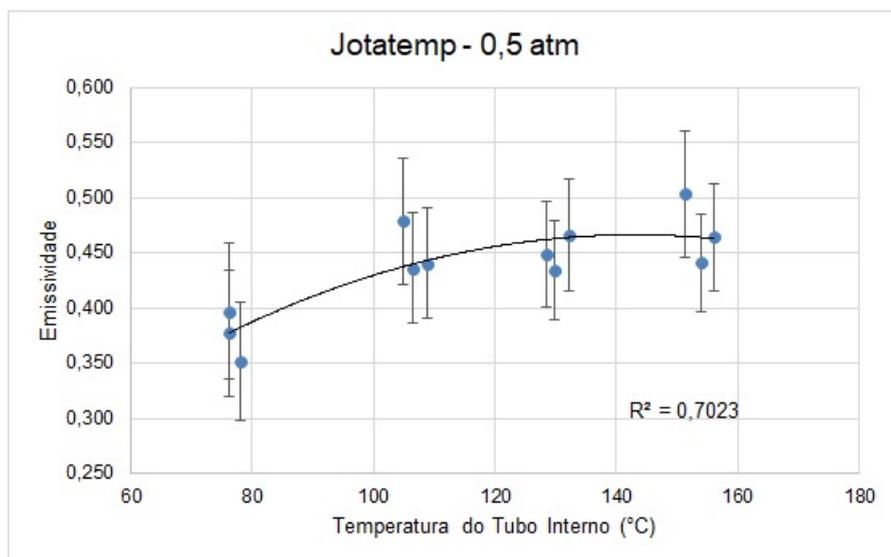


Figura 4.10: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

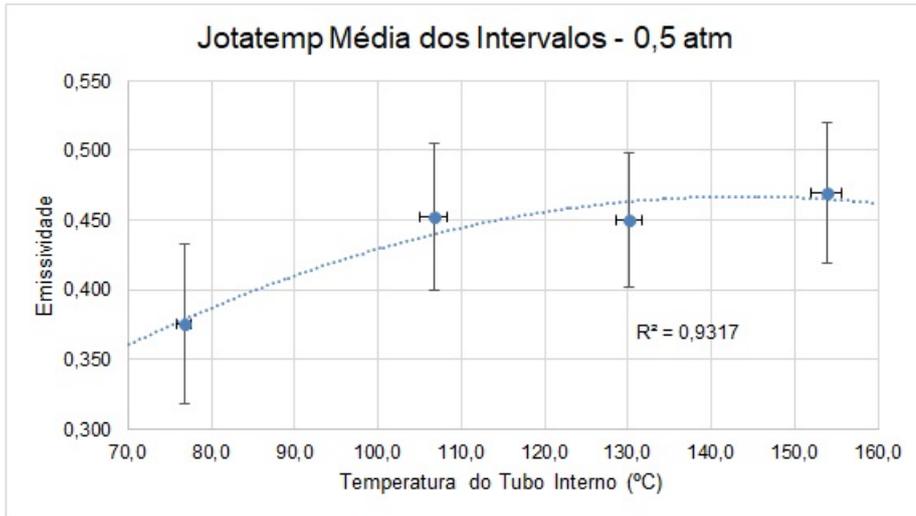


Figura 4.11: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

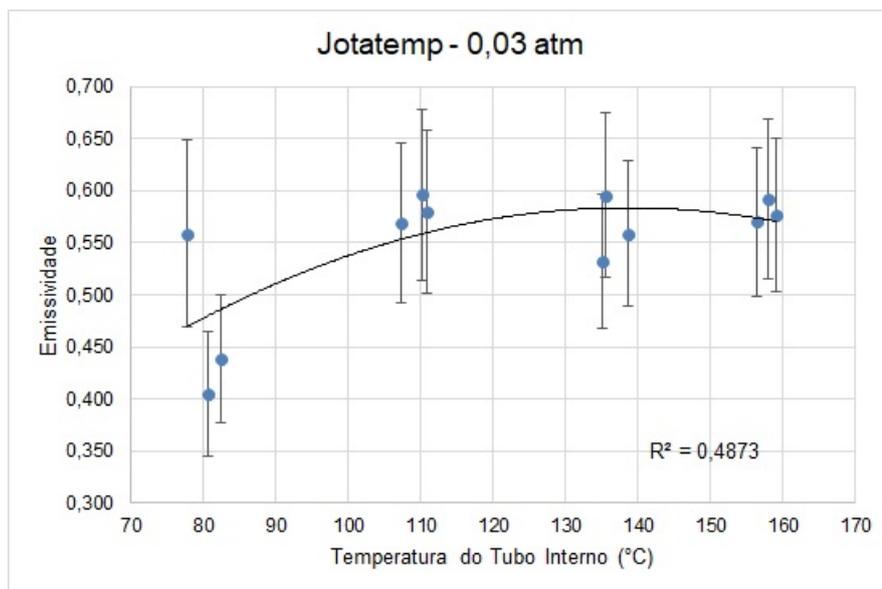


Figura 4.12: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

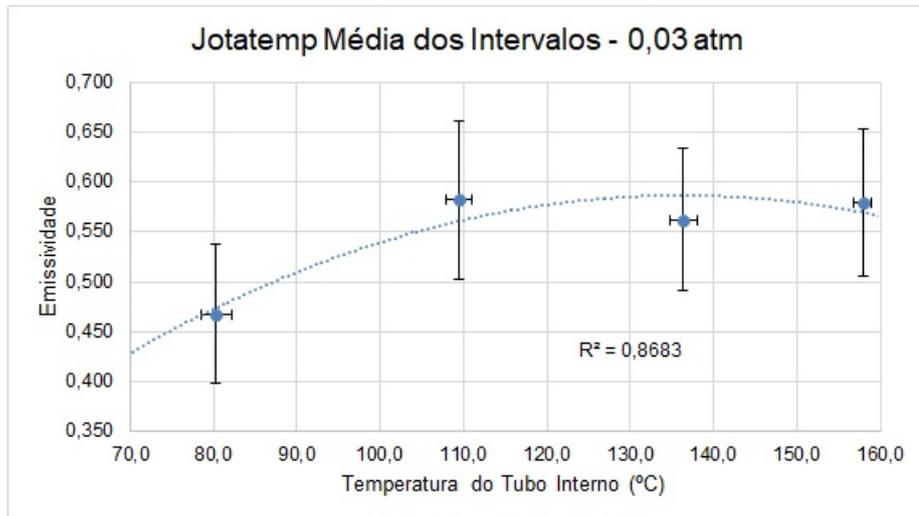


Figura 4.13: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

No caso do Jotatemp, observou-se uma incerteza associada levemente maior, porém na mesma faixa ( $\approx \pm 12\%$ ). No entanto, diferentemente do TSA, os valores encontrados estão bem abaixo do esperado pela medição do termógrafo.

Novamente, observa-se que o  $R^2$  nos casos da medição de emissividade ponto a ponto são muito baixos, mesmo com a aproximação por uma curva polinomial, demonstrado nas figuras 4.8, 4.10 e 4.12. Após a mesma realização de tratamento dos dados do caso do TSA, nota-se uma melhora significativa dos valores de  $R^2$ . Constata-se o mesmo comportamento que no caso do TSA, acima de 100 °C a emissividade está constante dentro das incertezas experimentais.

Assim como realizado para o caso do TSA, supõe-se que a emissividade é constante no intervalo observado. Portanto, a superfície de contorno e os resultados encontrados pelo matlab foram:

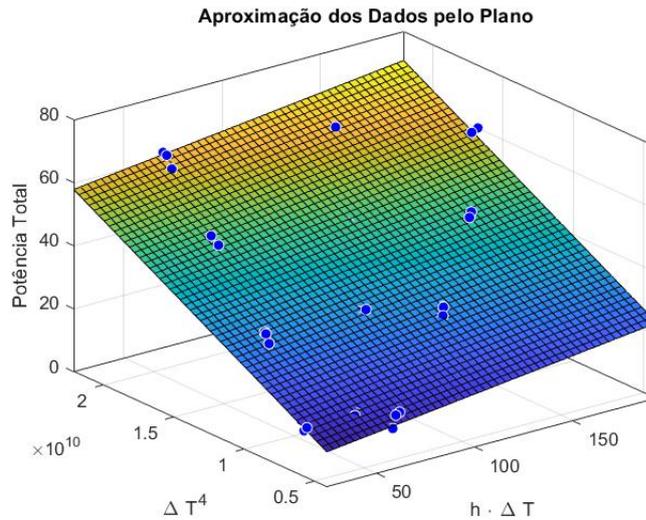


Figura 4.14: Representação da equação 2-53 para o Jotatemp1000 (Tampas Re-irradiantes)

$$C_2 = (2,591 \pm 0,125) \times 10^{-9}$$

$$\varepsilon_{Jot} = 0,697 \pm 0,115$$

$$R^2 = 0,9892$$

Neste caso, o ajuste teve um desvio padrão maior ( $\approx 16\%$ ) e o valor da emissividade ainda está discrepante com os encontrados no experimento do termógrafo. Apesar disso, nota-se que novamente a parametrização pelo comando *fit* do *matlab* apresentou valores mais próximos dos reais e com um  $R^2$  relativamente alto. Uma explicação provável para esta divergência seria a condução pelas tampas não ser desprezível. Se há dispersão de calor pelas mesmas as temperaturas de estabilidade na parede externa sofrem uma alteração significativa, obtendo valores menores que no caso das tampas adiabáticas. Assim, o calor de convecção é superestimado, assim como a constante  $h$ . Isso representaria um valor de radiação menor do que o real e, conseqüentemente, uma subestimação do valor de emissividade.

### 4.2.1.3 Superfície de Aço Naval

Por fim, foram encontrados valores de emissividade e sua incerteza associada ponto a ponto, como demonstrado nas tabelas presentes no anexo deste trabalho para o aço naval. A tabela 4.6 representa a média de emissividade destas tabelas anexadas.

Pressão	$\varepsilon_{aco}$	$\delta\varepsilon_{aco}$
1 atm	0,309	0,037
0,5 atm	0,335	0,037
0,03 atm	0,462	0,056

Tabela 4.6: Emissividade média relativo às tabelas 6.13, 6.14 e 6.15

Os valores individuais encontrados da emissividade para cada regime de pressão estão representados nas figuras 4.15, 4.17 e 4.19. Após o tratamento de dados obtém-se as médias dos intervalos de potência, como demonstrado nas figuras 4.16, 4.18 e 4.20.

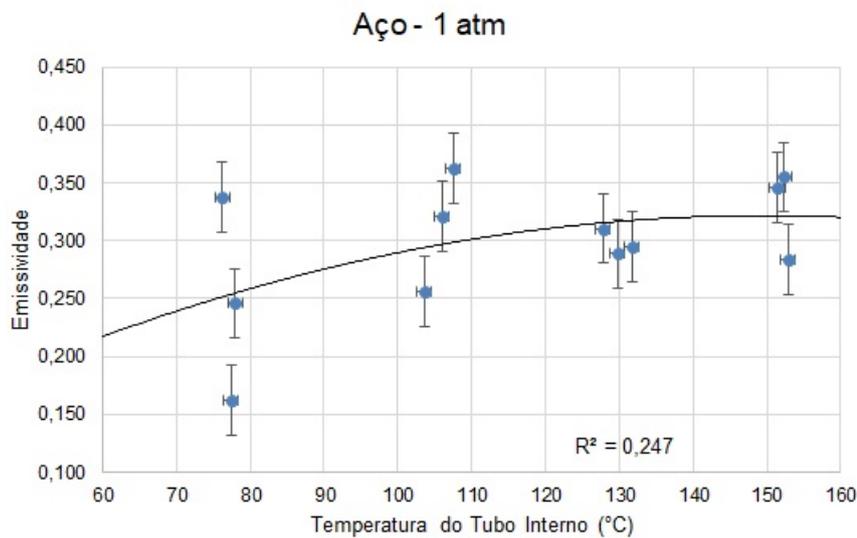


Figura 4.15: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

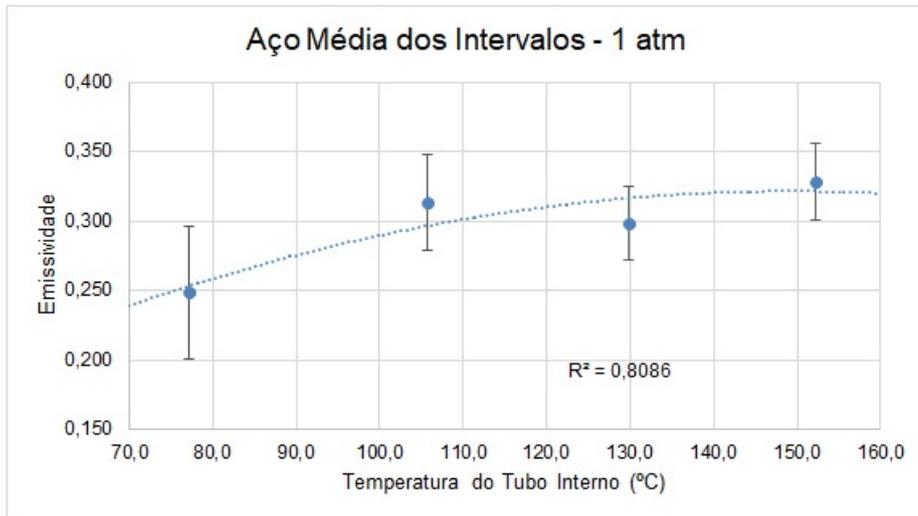


Figura 4.16: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

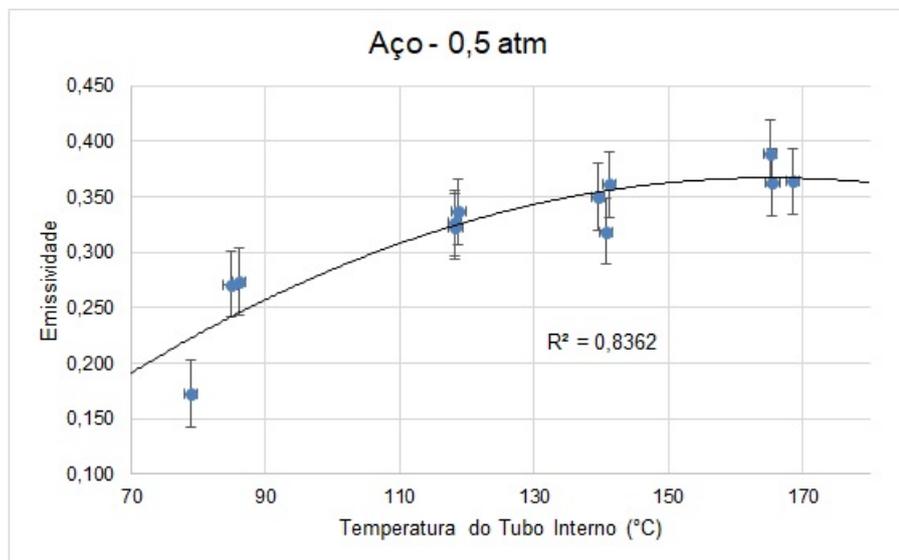


Figura 4.17: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

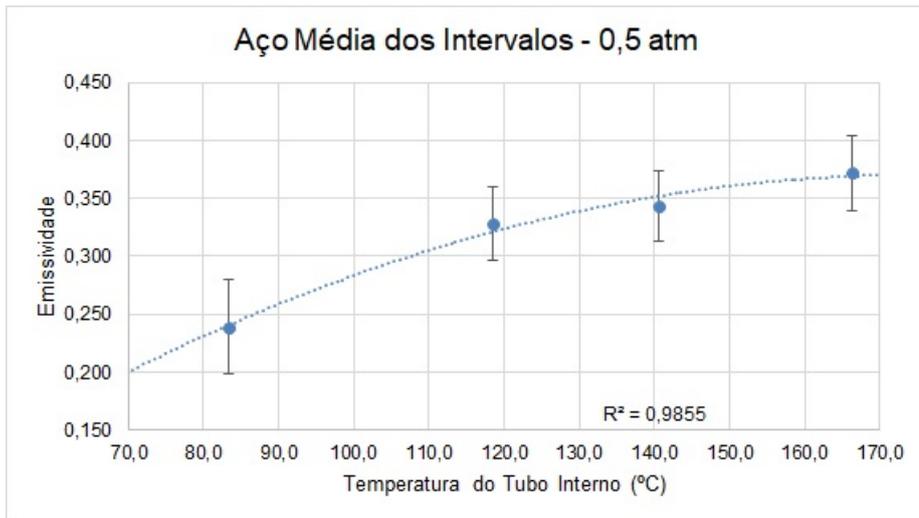


Figura 4.18: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

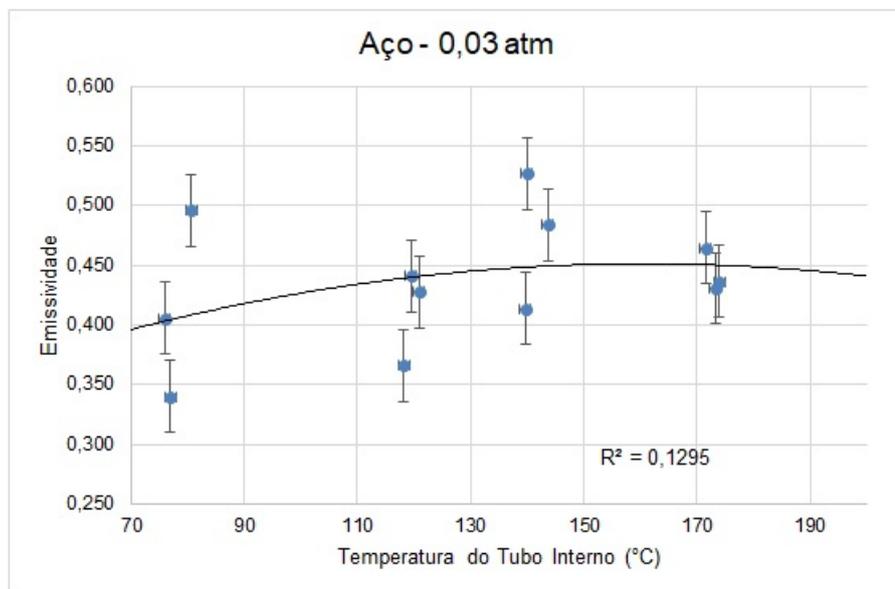


Figura 4.19: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

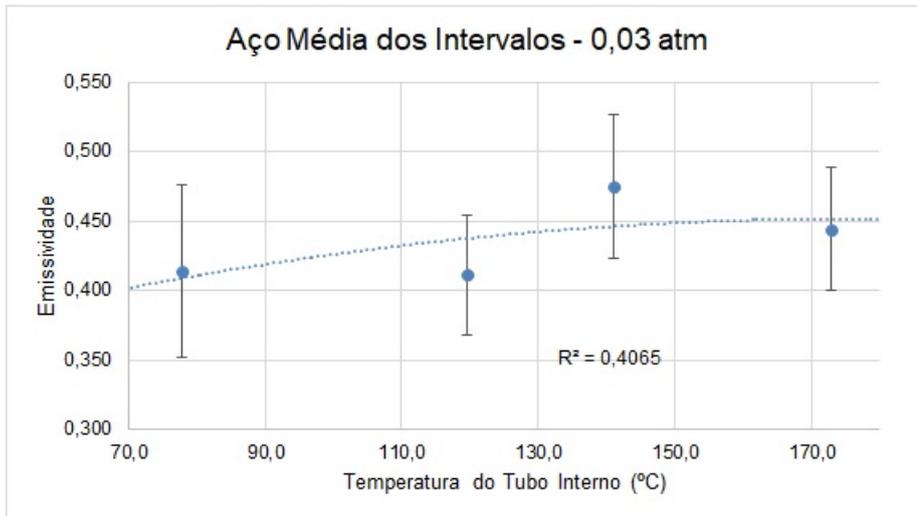


Figura 4.20: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese das tampas re-irradiantes

Neste caso, obteve-se novamente valores de incerteza em torno de 12% do valor da emissividade encontrada. As maiores variações foram para as baixas temperaturas como verificado nas tabelas 6.13, 6.14 e 6.15. Para os valores de potência entre 10 W e 35 W, há uma variação significativa do  $\Delta T/Q_r$ , principalmente nas pressões mais altas, onde o efeito da convecção é mais perceptível, isto pode ter causado esse aumento do desvio padrão encontrado. O caso do aço, assim como explicado para o Jotatemp, apresenta valores de emissividade mais altos, logo qualquer discrepância encontrada com os valores reais pode prover de perdas pelas tampas não contabilizadas.

Percebe-se que no caso do aço, o  $R^2$  para os pontos não tratados é extremamente baixo e mesmo nos pontos tratados persistem valores não satisfatórios para o mesmo. Nota-se aqui o mesmo comportamento dos dois casos anteriores, acima das temperaturas de 100 °C a emissividade permanece praticamente constante dentro do intervalo de incerteza experimental.

Utilizando a mesma suposição de emissividade constante no intervalo como realizado para o TSA e o Jotatemp, obtém-se a superfície de resposta e os resultados pelo *matlab*:

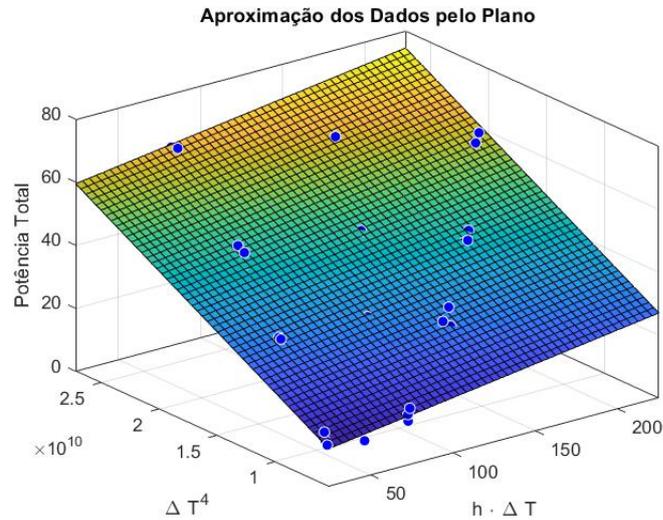


Figura 4.21: Representação da equação 2-53 para o Aço Naval (Tampas Re-irradiantes)

$$C_2 = (2,172 \pm 0,120) \times 10^{-9}$$

$$\varepsilon_{aco} = 0,546 \pm 0,076$$

$$R^2 = 0,9857$$

Neste caso, o ajuste teve um desvio padrão parecido com o anterior ( $\approx 6\%$ ), o valor da emissividade está próximo com o encontrado na tabela 4.3, porém ainda abaixo do esperado. O coeficiente de determinação  $R^2$  continua com valores acima de 95% o que indica uma boa representação dos pontos. Novamente, nota-se que os valores de emissividade foram muito mais próximos do medido pelo termógrafo, ainda que haja uma dissonância nesta medição.

## 4.2.2

### Hipótese do Cilindro Infinito

#### 4.2.2.1

#### Superfície de TSA

De forma análoga ao apresentado para a hipótese de tampas re-irradiantes, foram encontrados valores de emissividade e sua incerteza associada ponto a ponto, apresentados nas tabelas no anexo deste trabalho. A tabela 4.7 representa a média de emissividade destas tabelas anexadas.

Pressão	$\varepsilon_{TSA}$	$\delta\varepsilon_{TSA}$
1 atm	0,256	0,031
0,5 atm	0,259	0,027
0,03 atm	0,375	0,044

Tabela 4.7: Emissividade média relativo às tabelas 6.4, 6.5 e 6.6

Os valores individuais encontrados da emissividade para cada regime de pressão estão representados nas figuras 4.22, 4.24 e 4.26. Após o tratamento de dados obtém-se as médias dos intervalos de potência, como demonstrado nas figuras 4.23, 4.25 e 4.27.

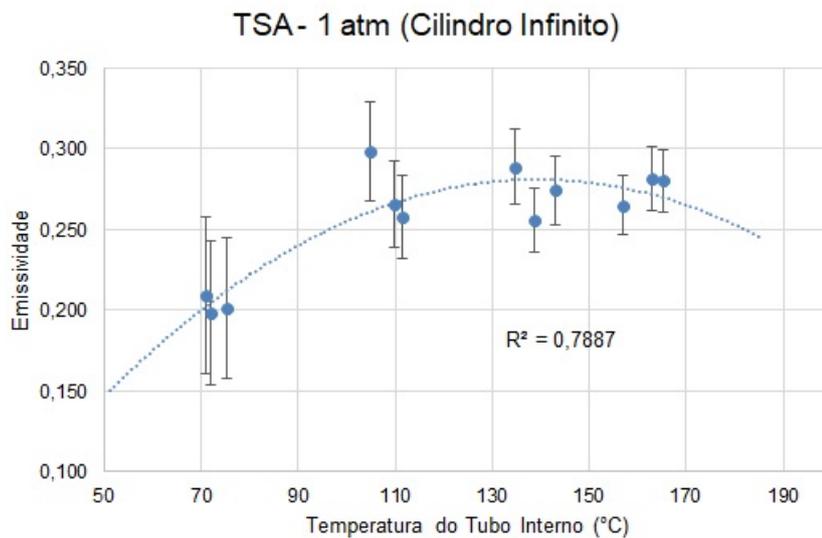


Figura 4.22: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito

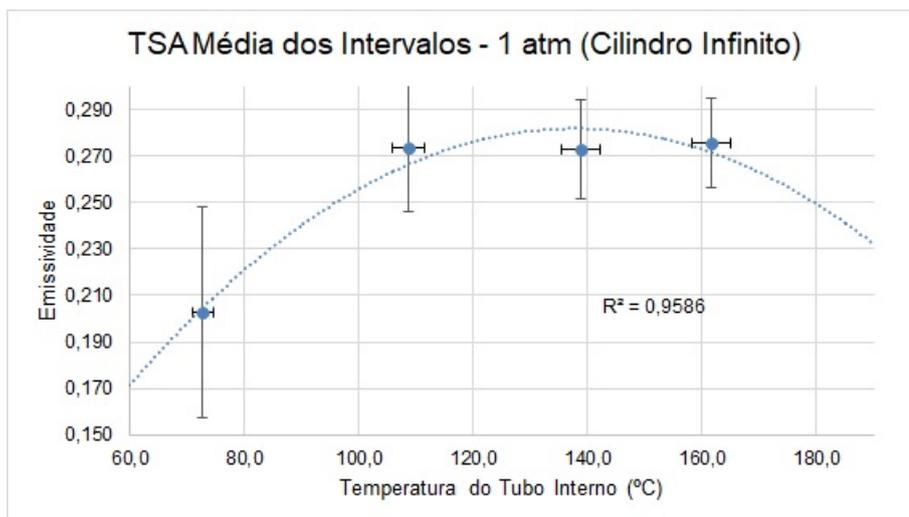


Figura 4.23: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito

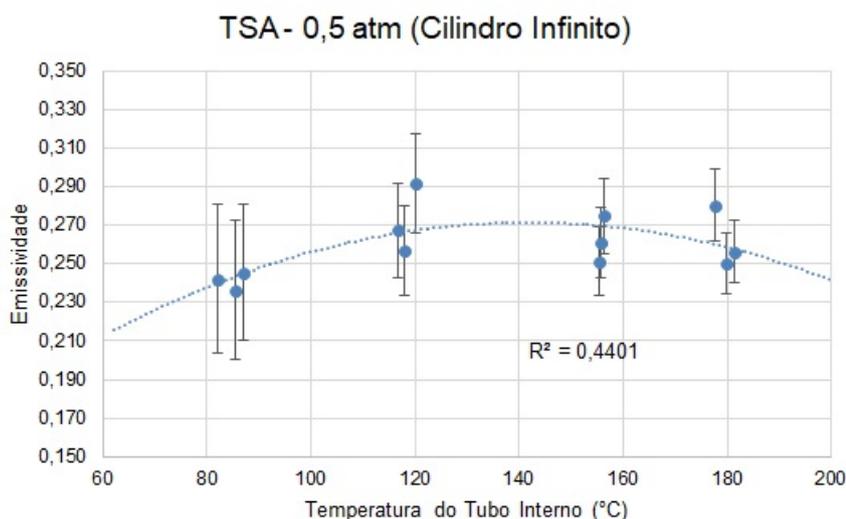


Figura 4.24: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito

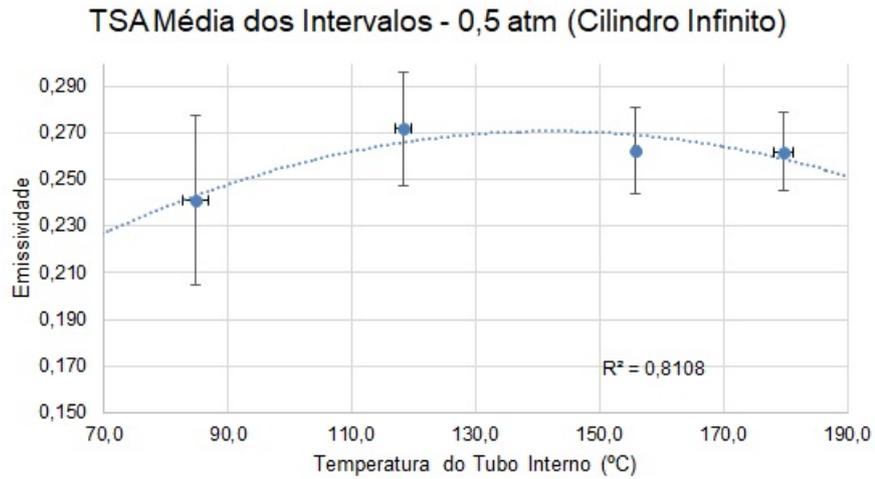


Figura 4.25: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito

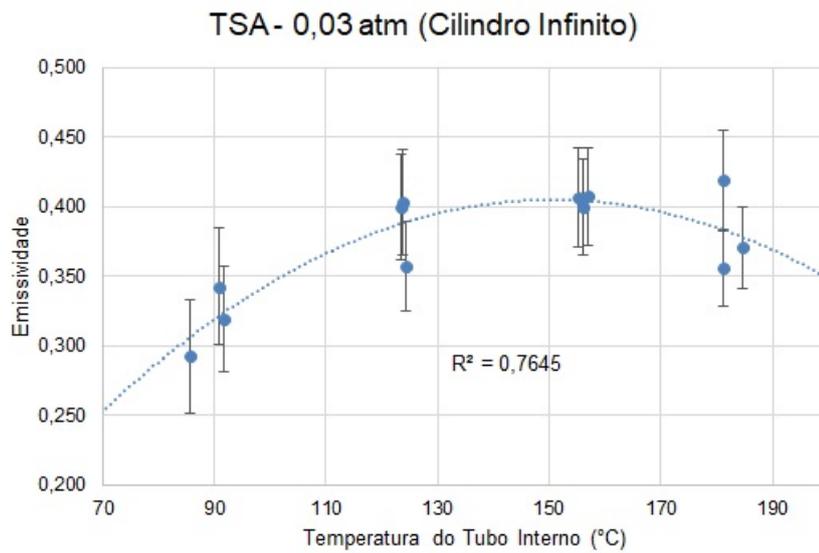


Figura 4.26: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito

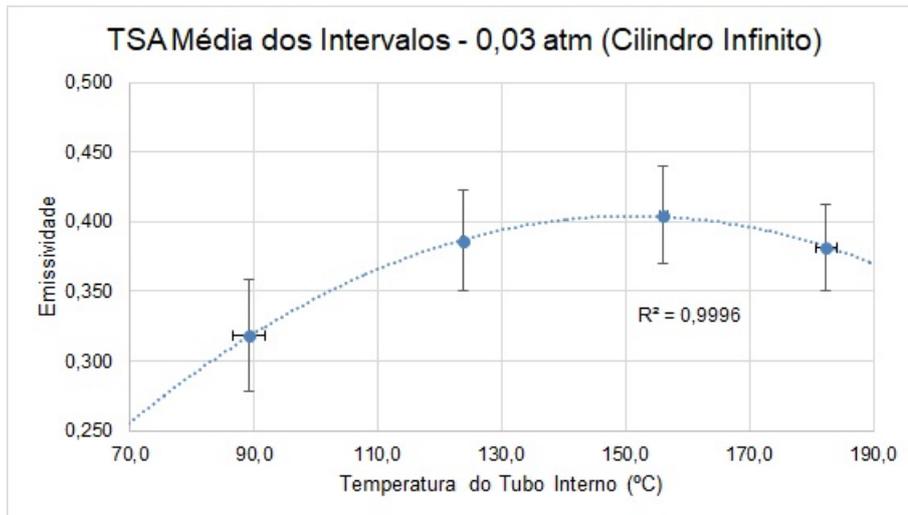


Figura 4.27: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito

Como pode ser observado nas figuras 4.22, 4.24 e 4.26, novamente os valores de emissividade apresentam uma variação pequena para cada pressão. As incertezas se tornam mais significativas com a diminuição da pressão em cada experimento, para a pressão de 1 atm tem-se  $\delta\varepsilon_{TSA} = 0,031$  já para a pressão de 0,03 atm tem-se  $\delta\varepsilon_{TSA} = 0,044$ . Como dito anteriormente, a alta dependência dos valores estimados do calor de convecção tem grande influência em todo o experimento, logo para os valores de baixa pressão a possibilidade de erros deverá ser maior. A incerteza das medições encontra-se em torno de 11% do valor da emissividade, assim como na hipótese para as tampas re-irradiantes.

Como pode-se observar nas figuras 4.22, 4.24 e 4.26, o  $R^2$  possui valores muito baixos. Após a divisão pelas médias dos intervalos de potência, demonstrado nas figuras 4.23, 4.25 e 4.27, observa-se um aumento significativo do  $R^2$ , a contrapartida do aumento no desvio padrão da temperatura é desprezível visto que a incerteza relativa à emissividade é, proporcionalmente, muito maior. Igualmente ao contemplado para a suposição das tampas re-irradiantes, acima das temperaturas de 100 °C os valores de emissividade são praticamente constantes dentro da incerteza experimental, mesmo para o caso de  $P = 1 atm$ .

Supondo a emissividade constante no intervalo observado e com os dados das tabelas 6.4, 6.5 e 6.6, pode-se utilizar o comando *fit* do *matlab* para obter a superfície de resposta:

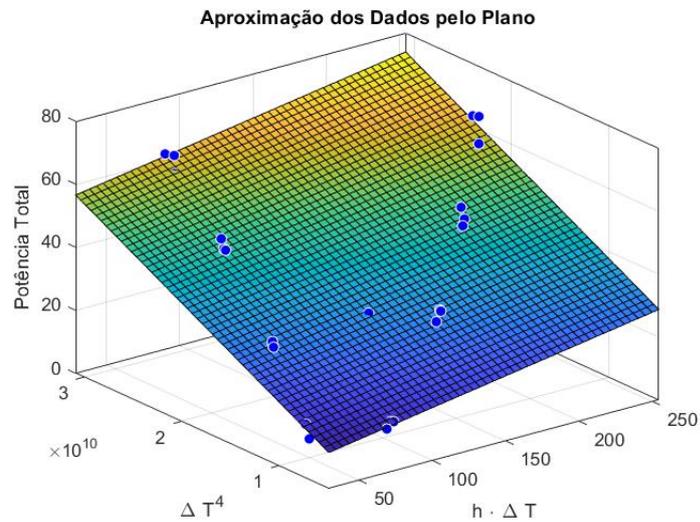


Figura 4.28: Representação da equação 2-53 para o TSA (Cilindros Infinitos)

A partir da constante retornada pelo programa, pode-se estimar a emissividade média do intervalo:

$$C_2 = (1,730 \pm 0,136) \times 10^{-9}$$

$$\varepsilon_{TSA} = 0,402 \pm 0,059$$

$$R^2 = 0,9764$$

Este resultado para a emissividade do TSA está bem próximo dos valores encontrados no experimento do termógrafo,  $\varepsilon_{cil} = 0,402 \pm 0,059$  e  $\varepsilon_{termog} = 0,414 \pm 0,029$ , ou seja, dentro da incerteza experimental esses valores são idênticos. Isso corrobora a adequação dessa hipótese como metodologia de determinação de emissividade.

### 4.2.2.2 Superfície de Jotatemp1000

Para a superfície coberta com o Jotatemp1000, foram encontrados os valores de emissividade e sua incerteza associada ponto a ponto, apresentados nas tabelas no anexo deste trabalho. A tabela 4.8 representa a média de emissividade destas tabelas anexadas.

Pressão	$\varepsilon_{Jot}$	$\delta\varepsilon_{Jot}$
1 atm	0,418	0,062
0,5 atm	0,459	0,066
0,03 atm	0,584	0,099

Tabela 4.8: Emissividade média relativo às tabelas 6.10, 6.11 e 6.12

Os valores individuais encontrados da emissividade para cada regime de pressão estão representados nas figuras 4.29, 4.31 e 4.33. Após o tratamento de dados obtém-se as médias dos intervalos de potência, como demonstrado nas figuras 4.30, 4.32 e 4.34.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1721776/CA

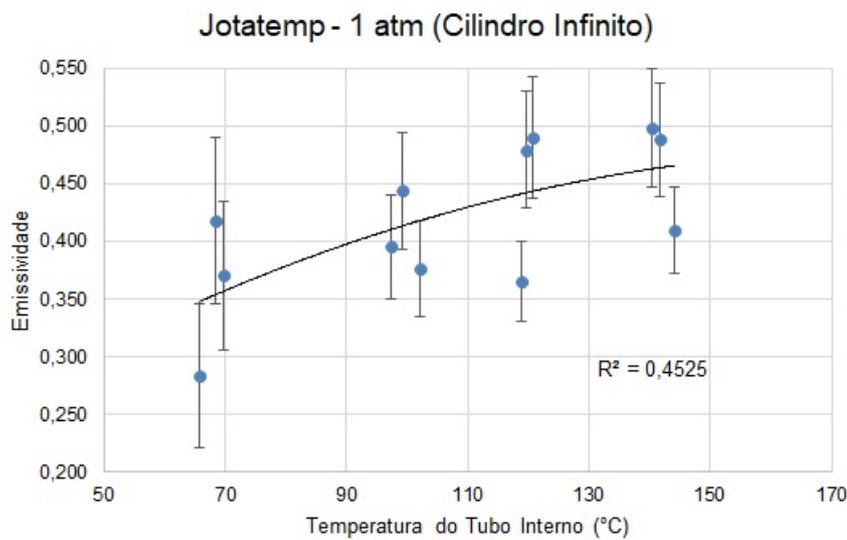


Figura 4.29: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito

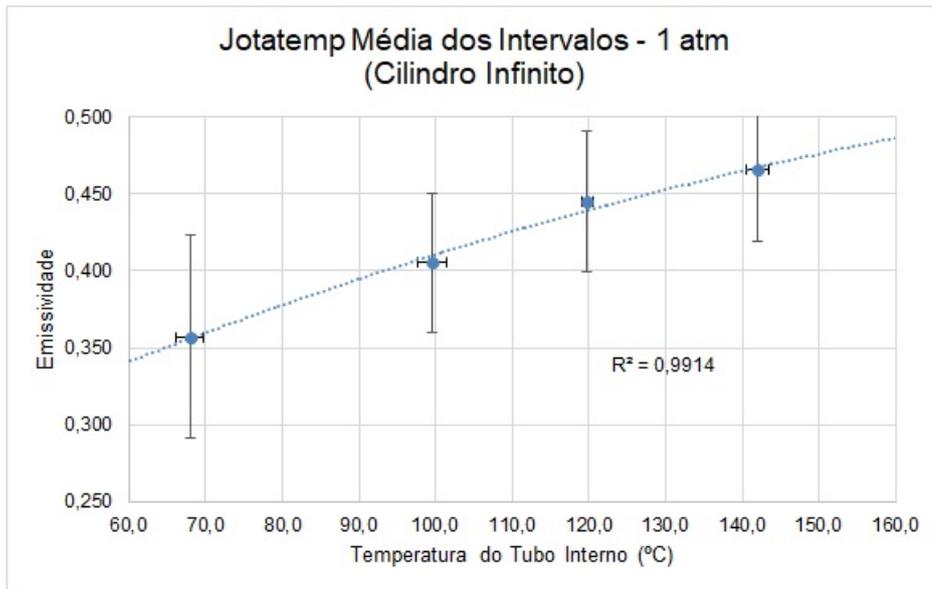


Figura 4.30: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito

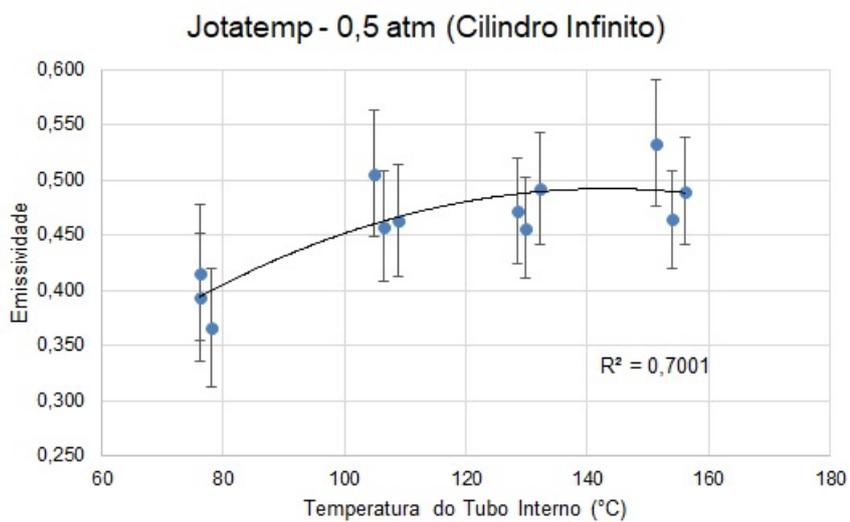


Figura 4.31: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito

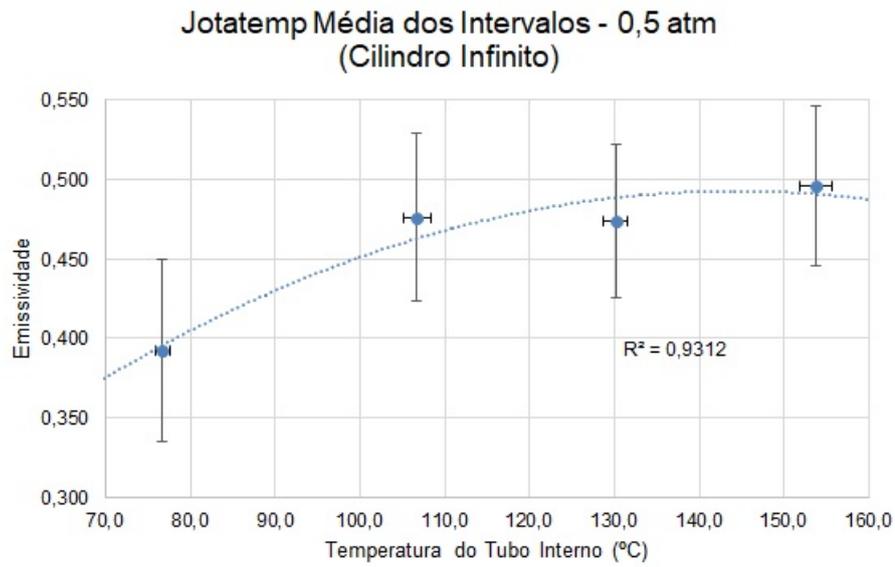


Figura 4.32: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito

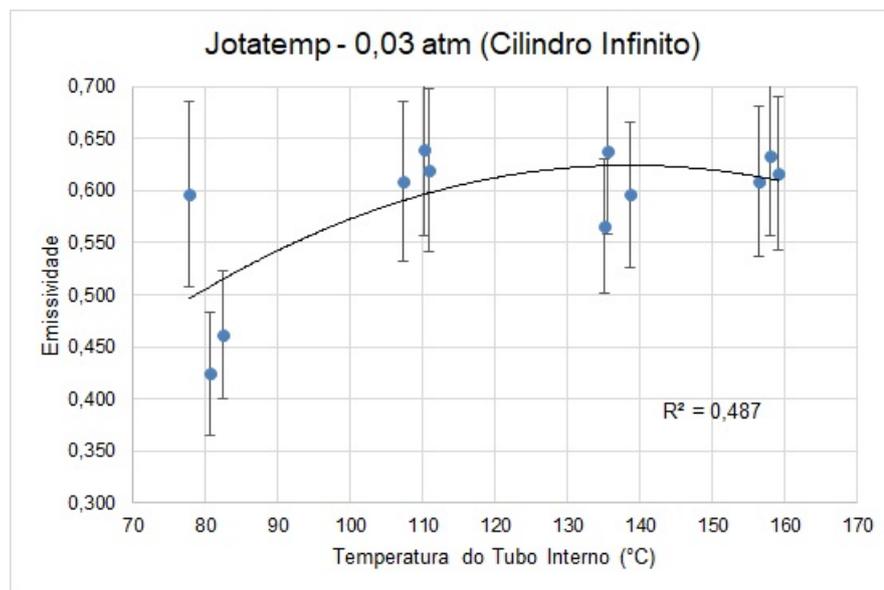


Figura 4.33: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito

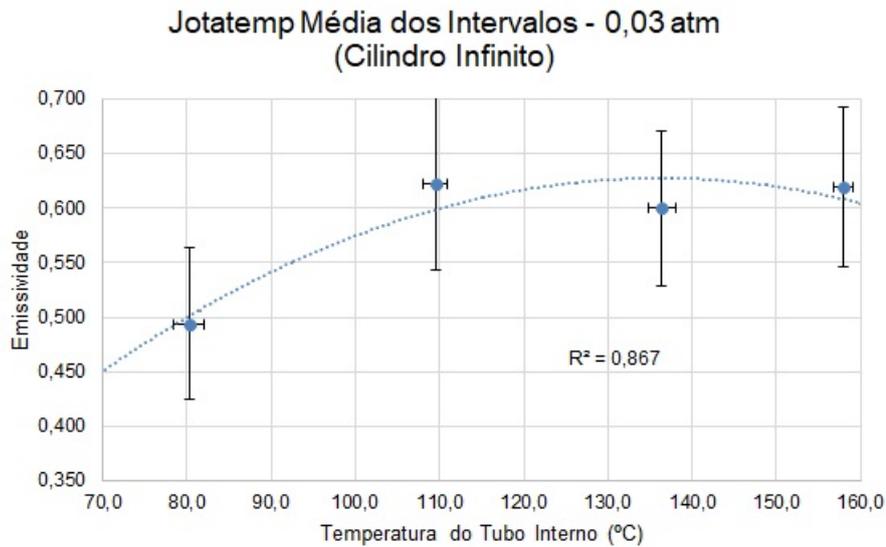


Figura 4.34: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito

Novamente, os valores de emissividade para o Jotatemp estão abaixo do medido pelo termógrafo, como verifica-se nas figuras 4.29, 4.31 e 4.33. Visto que foram utilizadas duas modelagens diferentes e ambas retornaram valores subestimados há de se considerar a perda de calor por condução nas tampas. Outra possibilidade seria a sensibilidade dos termopares visto que no caso do Jotatemp as temperaturas do tubo externo são maiores, pois o Jotatemp possui maior emissividade que os outros dois materiais.

Assim como no caso do TSA, observa-se que o  $R^2$  para o Jotatemp foi muito baixo (alta dispersão) como mostram as figuras 4.29, 4.31 e 4.33. Após o tratamento de dados, há um aumento significativo do  $R^2$  para os casos à pressão de 1 atm e 0,5 atm como pode-se verificar nas figuras 4.30 e 4.32, já para o caso 0,03 atm, mesmo após o tratamento de dados o valor do  $R^2$  não chegou a 0,9. Assim como observado para a hipótese de tampas re-irradiantes, constata-se que para os valores acima de 100 °C os valores de emissividade são praticamente constantes levando a incerteza experimental em consideração.

A partir, novamente, da suposição de emissividade constante no intervalo pode-se utilizar a equação 2-53 com o auxílio do comando *fit* do *matlab*:

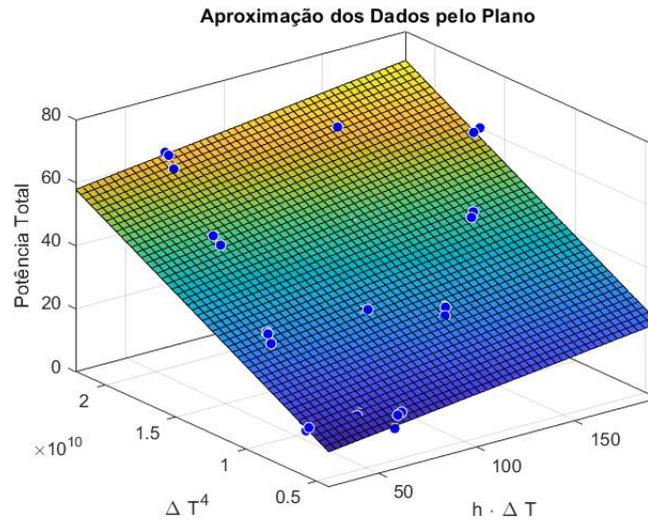


Figura 4.35: Representação da equação 2-53 para o Jotatemp1000 (Cilindros Infinitos)

$$C_2 = (2,591 \pm 0,125) \times 10^{-9}$$

$$\varepsilon_{Jot} = 0,690 \pm 0,135$$

$$R^2 = 0,9892$$

Os valores encontrados estão abaixo do esperado pela medição do termógrafo, este fato provavelmente está relacionado ao discutido na seção anterior. No caso de mais baixa pressão, a radiação deveria ter maior impacto na troca de calor, por conta disso qualquer superestimação da convecção natural pode gerar estimativas de radiação muito menores, ou seja, uma subestimação nos valores de emissividade e um aumento nos erros de estimativa.

### 4.2.2.3 Superfície de Aço Naval

Assim como o realizado anteriormente, foram encontrados os valores de emissividade e sua incerteza associada ponto a ponto, apresentados nas tabelas no anexo deste trabalho para o aço naval. A tabela 4.9 representa a média de emissividade destas tabelas anexadas.

Pressão	$\varepsilon_{aco}$	$\delta\varepsilon_{aco}$
1 atm	0,308	0,039
0,5 atm	0,333	0,040
0,03 atm	0,459	0,065

Tabela 4.9: Emissividade média relativo às tabelas 6.16, 6.17 e 6.18

Os valores individuais encontrados da emissividade para cada regime de pressão estão representados nas figuras 4.36, 4.38 e 4.40. Após o tratamento de dados obtém-se as médias dos intervalos de potência, como demonstrado nas figuras 4.37, 4.39 e 4.41.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1721776/CA

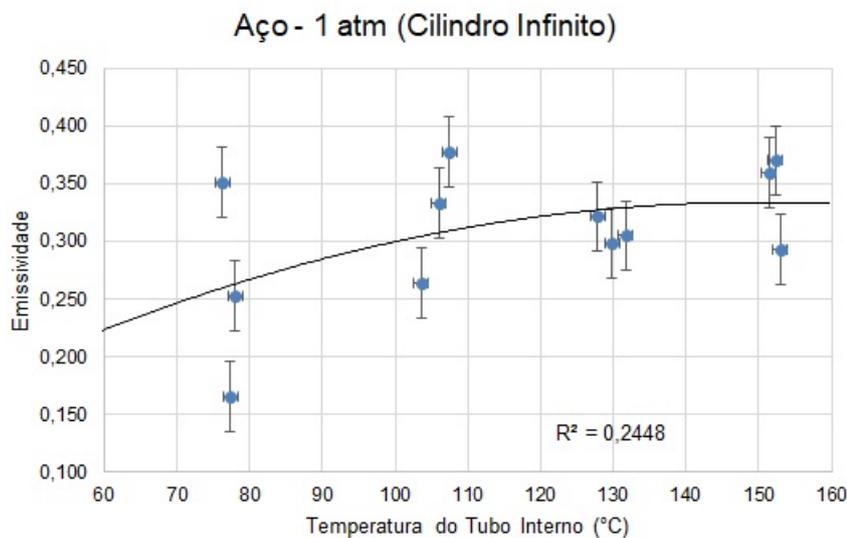


Figura 4.36: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito

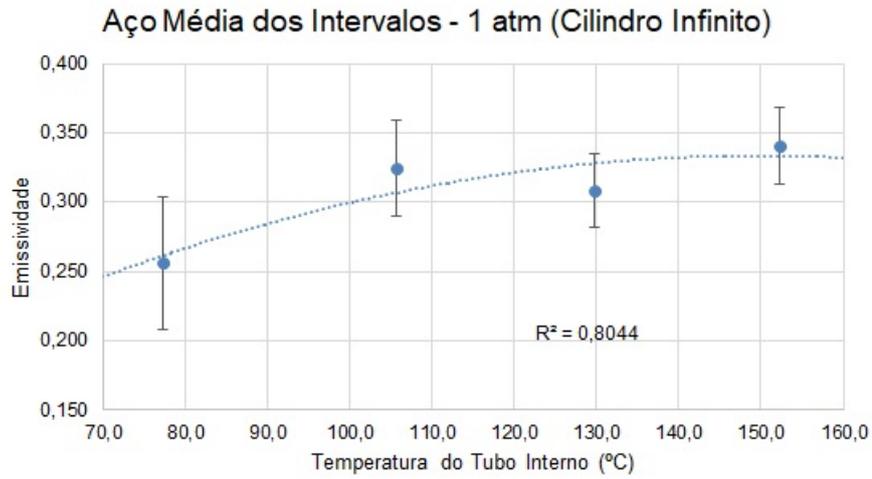


Figura 4.37: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 1 atm, hipótese do cilindro infinito

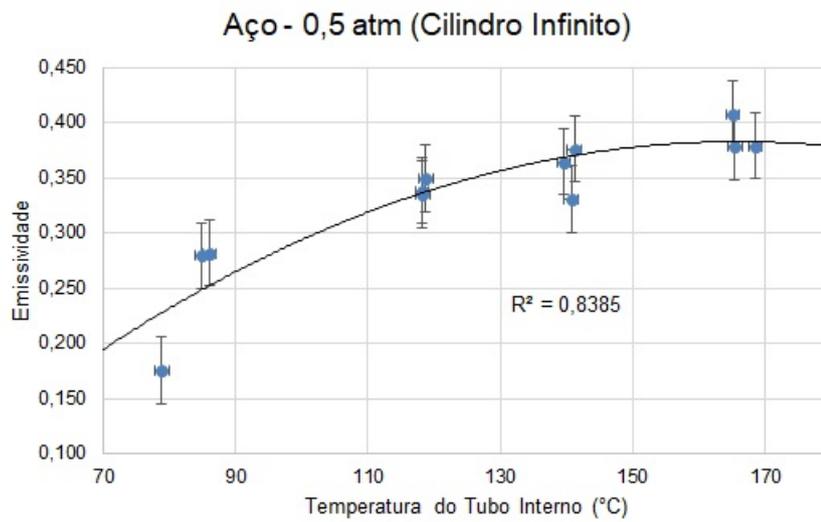


Figura 4.38: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito

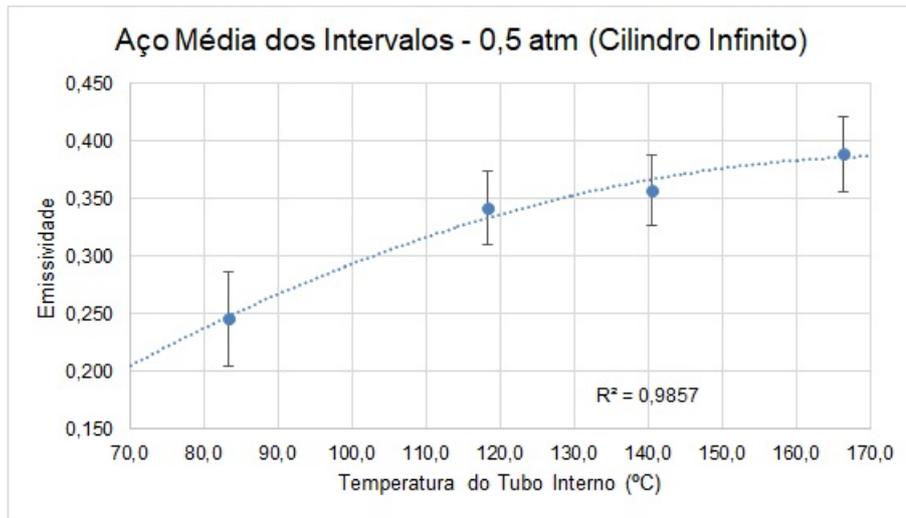


Figura 4.39: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,5 atm, hipótese do cilindro infinito

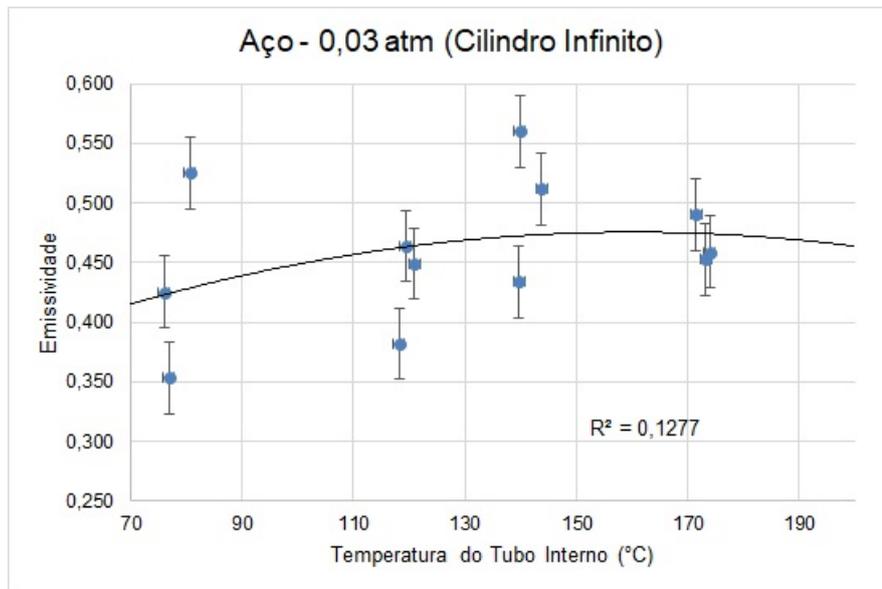


Figura 4.40: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito

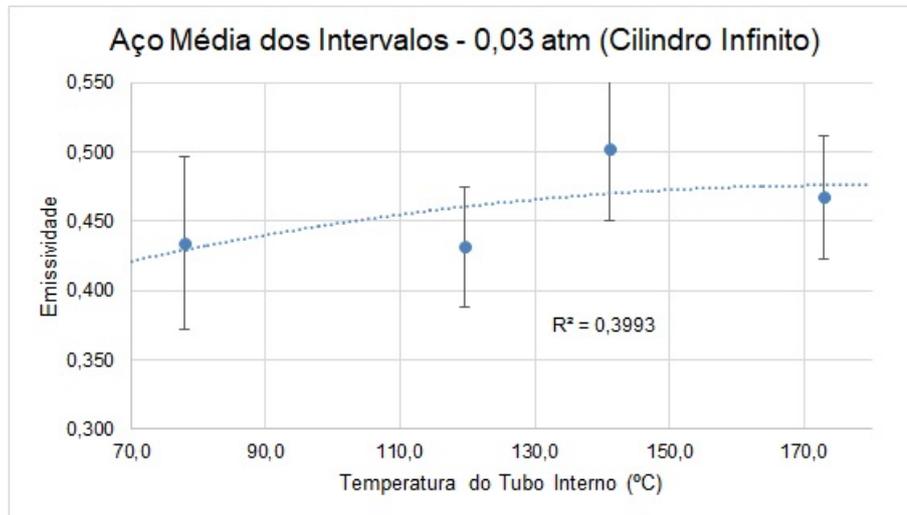


Figura 4.41: Médias dos Intervalos de Potência: Emissividade em Função da Temperatura Interna com Pressão de 0,03 atm, hipótese do cilindro infinito

Similar ao caso do tubo de latão com revestimento de Jotatemp1000, o aço naval possui emissividade mais alta. Há de se considerar, novamente, a possibilidade de perda de calor pelas tampas e também da superestimação do calor de convecção. Esta pode ser uma explicação para os valores de emissividade muito abaixo do esperado.

As figuras 4.36, 4.38 e 4.40 apresentam a alta discrepância dos valores de emissividade para o aço naval, principalmente nas temperaturas mais baixas, onde a sensibilidade do termopar é mais significativa. Após o tratamento de dados realizado, observa-se que é possível obter um  $R^2$  muito satisfatório para o caso de 0,5 atm mostrado na figura 4.39 e razoavelmente satisfatório para o caso de 1 atm na figura 4.37. Para o caso de 0,03 atm, os resultados foram muito discrepantes mesmo após o tratamento de dados, como mostrado na figura 4.41, é possível que isso seja devido a erros de medição.

A partir da hipótese de emissividade constante no intervalo, apresentada anteriormente, obtém-se a superfície de resposta descrita pela equação 2-53 com o comando *fit* do *matlab*:

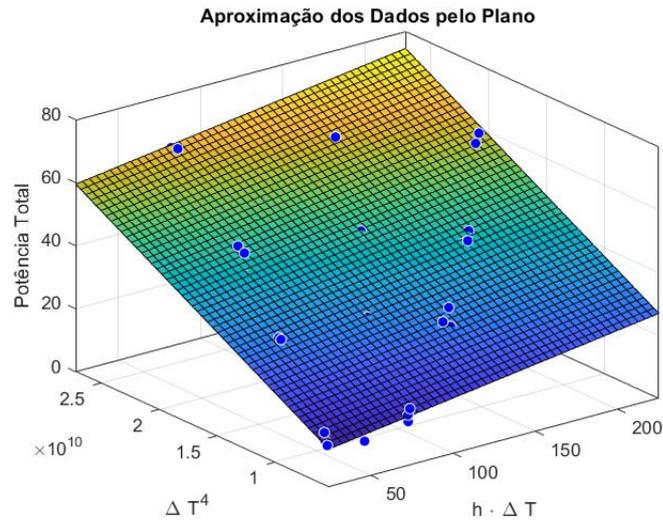


Figura 4.42: Representação da equação 2-53 para o Aço Naval (Cilindros Infinitos)

$$C_2 = (2,172 \pm 0,120) \times 10^{-9}$$

$$\varepsilon_{aco} = 0,541 \pm 0,088$$

$$R^2 = 0,9857$$

Os resultados encontrados no *fit* do *matlab*, apesar de mais baixos que o esperado, estão mais próximos do valor real do que os encontrados pelas tabelas 6.16, 6.17 e 6.18. Além disso, o  $R^2$  está muito mais adequado do que os apresentados nas figuras citadas anteriormente.

## 5

### Conclusão e Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve como objetivo a medição da emissividade de três superfícies por dois experimentos, um de medição direta utilizando um termógrafo de radiação infravermelha e outro de medição indireta usando a medição de troca de calor em um espaço anular. Foi conduzida uma breve revisão bibliográfica e modelagem do problema para a determinação da emissividade na seção 2. Para o segundo experimento, foram realizadas duas modelagens distintas, a primeira considerando a hipótese de tampas re-irradiantes, a segunda pressupondo cilindros infinitos. Os aparatos utilizados e a metodologia experimental foram descritos na seção 3 e os resultados analisados na seção 4.

Como pode ser observado na seção anterior, os valores de emissividade do TSA estão todos muito próximos dentro da incerteza experimental. Já para o Jotatemp1000 e o aço naval houve uma discrepância significativa entre os valores encontrados pelo experimento do termógrafo e da medição no espaço anular. Para ambas as modelagens do método do espaço anular, entretanto, os valores estão muito próximos. Este fato reforça a suposição de que as tampas não influenciam de forma significativa na radiação, desconsiderando a condução axial. Isso corrobora que o dimensionamento do experimento foi feito de forma adequada e os efeitos de borda não foram relevantes no experimento. Além disso, observa-se que os resultados obtidos através da parametrização do *matlab* foram os mais satisfatórios e superaram o cálculo ponto a ponto em todos os testes realizados. Diante de todos os resultados constata-se que a cobertura de Jotatemp1000 possui a maior emissividade em todos os testes, apesar das discrepâncias encontradas na medição no espaço anular, e por esse motivo é o material mais indicado para ser aplicado na estrutura dos *heat shields* dos *flares*.

É importante notar que as tampas provavelmente foram responsáveis por perdas de calor que não foram computadas. Esta é uma das possíveis explicações do porquê os valores de emissividade para o Jotatemp e aço naval foram menores dos que os encontrados pelo termógrafo. Em alguns dos experimentos, esta perda pode não ter sido desprezível resultando em temperaturas de estabilidade menores do que no caso de isolamento total, gerando uma superestimação do calor de convecção e subestimação, conseqüentemente, da

radiação. Visto que ambos são calculados por diferenças de temperatura da parede interna com a externa. Este efeito afeta o calor de radiação de forma maior, visto que sua equação depende de  $(T_1^4 - T_2^4)$ , desta forma encontra-se um valor de emissividade menor que o esperado.

Em ambos os experimentos, as temperaturas mais baixas apresentaram a maior discrepância em relação as demais. Além disso, nota-se que para todos os materiais a emissividade se mantém praticamente constante para os valores iguais ou superiores à 100 °C.

No experimento do termógrafo, houve uma discrepância nas medições quando medindo a emissividade de superfícies planas ou curvas, isto se dá, provavelmente, pelo fato do termógrafo não captar alguns raios refletidos pela superfície curva, resultando em um valor de radiação menor e (consequentemente) de menor emissividade em todos os casos.

Para trabalhos futuros, é interessante que sejam investigados mais materiais, assim como outros regimes de temperatura e pressão. Da mesma forma, é imprescindível que a condução pelas tampas seja medida ou faça parte da modelagem, desta forma será possível evidenciar como a suposição de condução desprezível afetou os resultados. A utilização de duas modelagens para a radiação nos deu evidências suficientes para constatar que as tampas de teflon não influenciam na transferência de calor por radiação para a geometria estudada, no entanto é necessário que sejam medidas as perdas de calor, se houverem, pelas mesmas para que essa suposição seja confirmada ou descartada como influência considerável nos valores de emissividade abaixo do esperado.

## 6

### Referências bibliográficas

1 EPE. **Brazilian Energy Balance 2020, Final Report**. 2020. <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.

2 ANP. **Produção de petróleo bate recorde e ultrapassa 1 bilhão de barris**. 2020. <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-01/producao-de-petroleo-bate-recorde-e-ultrapassa-1-bilhao-de-barris>>. Citado na página 18.

3 IBP. **Evolução da reinjeção de gás natural no Brasil entre 2010 e 2019**. 2020. <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/evolucao-da-reinjecao-de-gas-natural-no-brasil>>. Citado na página 18.

4 PAGOT, P. et al. Offshore production flares – a petrobras review. **Rio Oil & Gas Expo and Conference 2008**, 2008. Citado 6 vezes nas páginas 19, 21, 24, 25, 26 e 27.

5 BADER, A.; BAUKAL, C.; BUSSMAN, W. Selecting the proper flare systems. **Brazilian Petroleum, Gas and Biofuels Institute**, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 19, 20, 22, 23 e 27.

6 KIM, S. et al. Experimental study of the reduction of high temperatures and radiation using heat shields associated with flare towers of offshore oil and gas platforms. 2014. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 22.

7 American Petroleum Institute. Api-521. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

8 INCROPERA, F. et al. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. [S.l.]: Editora John Wiley & Sons, 2007. Citado 12 vezes nas páginas 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 e 44.

9 AL-KOUZ, W. et al. Two dimensional analysis of low pressure flows in the annulus region between two concentric cylinders. 2016. Citado na página 40.

10 SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentals of Thermodynamics**. [S.l.]: Editora Blucher, 2009. Citado na página 41.

11 LEMMON, E.; JACOBSEN, R. Viscosity and thermal conductivity equations for nitrogen, oxygen, argon, and air. **International Journal of Thermophysics**, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

12 HOLMAN, J. **Heat Transfer**. [S.l.]: McGraw-Hill, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 44.

13 KREITH, F.; MANGLIK, R.; BOHN, M. **Principles of Heat Transfer**. [S.l.]: Intext Educational Publishers, 1973. Citado na página 43.

- 14 ARPINO, F. et al. Transient natural convection in partially porous vertical annuli. **International Journal of Heat and Technology**, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 59.
- 15 KEYHANI, M.; KULACKI, F.; CRISTENSEN, R. Free convection in a vertical annulus with constant heat flux on the inner wall. **Journal of Heat Transfer**, 1983. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 59.
- 16 HANSSEN, L.; SNAIL, K. Integrating spheres for mid- and near-infrared reflection spectroscopy. 2002. Citado na página 46.
- 17 SULLY, A. H.; BRANDES, E. A.; WATERHOUSE, R. B. Some measurements of the total emissivity of metals and pure refractory oxides and the variation of emissivity with temperature. **British Journal of Applied Physics**, 1952. Citado na página 47.
- 18 BRAGA, C.; BRAGA, S.; ORLANDO, A. Determinação experimental da emissividade de superfícies. **VIII COBEM**, 1985. Citado na página 47.
- 19 ARKHIPOV, V. et al. Measurement procedure for surface emissivity of heat-shielding materials. 2016. Citado na página 48.
- 20 AL-JUBURY, S. Experimental estimation of emissivity of surfaces with various coating. 2019. Citado na página 48.
- 21 LANC, Z. et al. Determination of emissivity of brass alloy using infrared thermographic technique. 2018. Citado na página 49.
- 22 MAYR-SCHMÖLZER, B. et al. A method for measuring the high temperature emissivity of refractory metal surfaces. **19th Plansee Seminar**, 2017. Citado na página 50.
- 23 HONNER, M.; HONNEROVÁ, P. Survey of emissivity measurement by radiometric methods. 2014. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.
- 24 ZHANG, F. et al. An emissivity measurement apparatus for near infrared spectrum. **Infrared Physics & Technology**, 2015. Citado na página 51.
- 25 ZHANG, K. et al. An improved algorithm for spectral emissivity measurements at low temperatures based on the multi-temperature calibration method. 2017. Citado na página 52.
- 26 ZHANG, K. et al. Development of experimental apparatus for precise emissivity determination based on the improved method compensating disturbances by background radiation. 2018. Citado na página 52.
- 27 HONNEROVA, P. et al. New experimental device for high temperature normal spectral emissivity measurements of coatings. 2014. Citado na página 52.
- 28 SHI, D. et al. Experimental study of the relationships between the spectral emissivity of brass and the temperature in the oxidizing environment. 2014. Citado na página 59.

## Anexo

### TSA

#### Tampas Reirradiantes

TSA - P = 1 atm - Tampas Reirradiantes								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
15	344,9	308,1	10,1	4,9	59,47	2,05	0,199	0,047
15	348,4	311,8	9,9	5,1	58,73	2,03	0,202	0,046
14	344,1	309,8	9,2	4,8	56,80	2,00	0,210	0,051
33	382,8	320,0	19,5	13,5	46,15	2,33	0,267	0,028
32	377,8	318,3	18,3	13,7	41,83	2,31	0,299	0,033
33	384,5	321,4	19,6	13,4	47,33	2,33	0,259	0,027
47	407,6	328,2	25,9	21,1	42,99	2,45	0,290	0,025
47	411,7	329,7	26,9	20,1	47,71	2,46	0,256	0,021
49	415,9	331,7	26,5	22,5	44,89	2,44	0,275	0,022
59	429,9	334,2	32,4	26,6	46,22	2,54	0,266	0,020
64	435,9	336,3	33,9	30,1	43,91	2,55	0,283	0,021
64	438,1	338,9	33,6	30,4	44,10	2,54	0,281	0,021

Tabela 6.1: Emissividade do TSA à pressão de 1 atm - Hipótese das tampas reirradiantes

TSA - P = 0,5 atm - Tampas Reirradiantes								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
17	359,9	312,6	8,7	8,3	49,38	1,38	0,246	0,037
16	358,4	312,8	8,3	7,7	51,00	1,36	0,237	0,038
15	355,0	311,8	7,7	7,3	49,95	1,34	0,243	0,041
30	389,8	319,2	14,3	15,7	45,89	1,52	0,268	0,026
30	391,0	319,4	14,5	15,5	47,43	1,52	0,258	0,025
33	393,0	319,3	15,1	17,9	42,64	1,54	0,293	0,027
46	428,4	331,7	20,7	25,3	48,36	1,61	0,252	0,019
48	428,7	329,8	21,4	26,6	46,78	1,62	0,262	0,019
49	429,3	330,9	21,2	27,8	44,82	1,62	0,276	0,021
62	454,4	336,1	26,4	35,6	47,58	1,68	0,257	0,017
60	452,7	336,4	25,9	34,1	48,54	1,67	0,251	0,017
61	450,8	338,3	24,7	36,3	44,05	1,65	0,282	0,020

Tabela 6.2: Emissividade do TSA à pressão de 0,5 atm - Hipótese das tampas reirradiantes

TSA - P = 0,03 atm - Tampas Reirradiantes								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	364,6	313,5	4,5	11,5	39,50	0,66	0,321	0,041
13	358,7	314,1	3,9	9,1	42,50	0,65	0,294	0,043
16	363,7	314,7	4,3	11,7	37,26	0,66	0,345	0,045
30	396,5	324,8	6,6	23,4	32,92	0,69	0,402	0,042
29	397,2	322,7	6,9	22,1	36,04	0,69	0,359	0,035
31	396,8	322,5	6,8	24,2	32,74	0,69	0,405	0,042
47	429,2	331,6	9,4	37,6	32,94	0,72	0,402	0,038
47	428,2	331,2	9,3	37,7	32,47	0,72	0,409	0,039
49	430,0	328,9	9,7	39,3	32,44	0,72	0,410	0,039
64	454,3	339,0	11,5	52,5	31,74	0,75	0,421	0,040
58	454,2	337,7	11,6	46,4	36,11	0,75	0,358	0,030
62	457,6	337,6	12,0	50,0	34,99	0,75	0,373	0,032

Tabela 6.3: Emissividade do TSA à pressão de 0,03 atm - Hipótese das tampas reirradiantes

### Cilindro Infinito

TSA - P = 1 atm - Cilindro Infinito								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
15	344,9	308,1	10,1	4,9	5,69	2,05	0,194	0,045
15	348,4	311,8	9,9	5,1	5,62	2,03	0,196	0,044
14	344,1	309,8	9,2	4,8	5,44	2,00	0,204	0,048
33	382,8	320	19,5	13,5	4,42	2,33	0,257	0,026
32	377,8	318,3	18,3	13,7	4,01	2,31	0,288	0,030
33	384,5	321,4	19,6	13,4	4,53	2,33	0,250	0,025
47	407,6	328,2	25,9	21,1	4,12	2,45	0,279	0,023
47	411,7	329,7	26,9	20,1	4,57	2,46	0,248	0,019
49	415,9	331,7	26,5	22,5	4,30	2,44	0,266	0,020
59	429,9	334,2	32,4	26,6	4,43	2,54	0,257	0,018
64	435,9	336,3	33,9	30,1	4,20	2,55	0,272	0,019
64	438,1	338,9	33,6	30,4	4,22	2,54	0,271	0,019

Tabela 6.4: Emissividade do TSA à pressão de 1 atm - Hipótese dos cilindros infinitos

TSA - P = 0,5 atm - Cilindro Infinito								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
17	359,9	312,6	8,7	8,3	4,73	1,38	0,238	0,035
16	358,4	312,8	8,3	7,7	4,88	1,36	0,230	0,036
15	355,0	311,8	7,7	7,3	4,78	1,34	0,235	0,038
30	389,8	319,2	14,3	15,7	4,39	1,52	0,259	0,024
30	391,0	319,4	14,5	15,5	4,54	1,52	0,249	0,023
33	393,0	319,3	15,1	17,9	4,08	1,54	0,282	0,025
46	428,4	331,7	20,7	25,3	4,63	1,61	0,244	0,017
48	428,7	329,8	21,4	26,6	4,48	1,62	0,253	0,018
49	429,3	330,9	21,2	27,8	4,29	1,62	0,266	0,019
62	454,4	336,1	26,4	35,6	4,56	1,68	0,249	0,016
60	452,7	336,4	25,9	34,1	4,65	1,67	0,243	0,015
61	450,8	338,3	24,7	36,3	4,22	1,65	0,271	0,018

Tabela 6.5: Emissividade do TSA à pressão de 0,5 atm - Hipótese dos cilindros infinitos

TSA - P = 0,03 atm - Cilindro Infinito								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	364,6	313,5	4,5	11,5	3,78	0,66	0,308	0,038
13	358,7	314,1	3,9	9,1	4,07	0,65	0,283	0,040
16	363,7	314,7	4,3	11,7	3,57	0,66	0,330	0,041
30	396,5	324,8	6,6	23,4	3,15	0,69	0,382	0,037
29	397,2	322,7	6,9	22,1	3,45	0,69	0,343	0,031
31	396,8	322,5	6,8	24,2	3,13	0,69	0,384	0,037
47	429,2	331,6	9,4	37,6	3,15	0,72	0,382	0,034
47	428,2	331,2	9,3	37,7	3,11	0,72	0,388	0,035
49	430,0	328,9	9,7	39,3	3,11	0,72	0,389	0,035
64	454,3	339,0	11,5	52,5	3,04	0,75	0,399	0,035
58	454,2	337,7	11,6	46,4	3,46	0,75	0,342	0,027
62	457,6	337,6	12	50	3,35	0,75	0,355	0,028

Tabela 6.6: Emissividade do TSA à pressão de 0,03 atm - Hipótese dos cilindros infinitos

**Jotatemp1000****Tampas Reirradiantes**

Jotatemp - P = 1 atm - Tampas Reirradiantes								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	342,7	309,9	8,6	7,4	35,0	1,98	0,372	0,070
16	341,5	309,9	8,2	7,8	31,8	1,95	0,420	0,080
13	338,6	308,6	7,7	5,3	43,6	1,93	0,285	0,067
30	370,4	318,3	15,4	14,6	33,2	2,22	0,397	0,049
31	375,1	321,3	16,0	15,0	34,5	2,23	0,379	0,045
32	372,2	319,5	15,6	16,4	30,3	2,23	0,447	0,056
46	392,7	325,5	21,1	24,9	28,6	2,35	0,483	0,057
47	393,6	325,7	21,3	25,7	28,1	2,36	0,493	0,059
40	391,8	326,3	20,4	19,6	35,4	2,33	0,368	0,038
60	413,4	333,8	25,7	34,3	27,8	2,42	0,502	0,058
56	417,0	337,2	25,6	30,4	32,3	2,41	0,412	0,041
59	414,6	335,9	25,2	33,8	28,2	2,41	0,491	0,056

Tabela 6.7: Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 1 atm - Hipótese das tampas reirradiantes

Jotatemp - P = 0,5 atm - Tampas Reirradiantes								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	351,0	311,8	6,8	9,2	35,3	1,31	0,369	0,059
16	349,2	311,9	6,4	9,6	31,9	1,29	0,418	0,068
16	349,1	310,3	6,5	9,5	33,3	1,30	0,396	0,064
31	379,5	320,2	11,4	19,6	29,6	1,45	0,461	0,056
33	377,8	317,1	11,8	21,2	27,4	1,46	0,510	0,065
32	381,8	321,6	11,6	20,4	29,3	1,45	0,467	0,056
44	402,8	326,8	15,5	28,5	29,7	1,53	0,460	0,051
46	405,1	329,3	15,3	30,7	28,0	1,52	0,496	0,058
45	401,5	324,5	15,8	29,2	28,9	1,54	0,475	0,054
60	427,1	334,0	19,7	40,3	29,3	1,59	0,467	0,050
62	424,3	333,7	19,0	43,0	26,4	1,58	0,538	0,065
61	429,0	337,9	19,0	42,0	28,1	1,57	0,493	0,055

Tabela 6.8: Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 0,5 atm - Hipótese das tampas reirradiantes

Jotatemp - P = 0,03 atm - Tampas Reirradiantes								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
14	353,6	314,3	3,4	10,6	31,4	0,65	0,427	0,066
16	350,9	313,6	3,2	12,8	24,3	0,65	0,602	0,103
16	355,4	312,8	3,7	12,3	29,4	0,65	0,465	0,069
32	383,3	322,1	5,5	26,5	23,2	0,68	0,645	0,096
30	380,4	320,4	5,4	24,6	24,0	0,67	0,614	0,089
32	383,8	321,5	5,6	26,4	23,7	0,68	0,626	0,091
47	408,6	329,1	7,5	39,5	23,2	0,70	0,644	0,092
48	411,6	329,3	8,5	39,5	24,3	0,70	0,602	0,081
43	408,0	329,7	7,3	35,7	25,2	0,70	0,571	0,074
59	429,4	336,8	9,0	50,0	24,0	0,73	0,614	0,083
62	431,0	336,5	9,2	52,8	23,3	0,73	0,640	0,090
62	432,2	336,5	9,3	52,7	23,7	0,73	0,622	0,085

Tabela 6.9: Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 0,03 atm - Hipótese das tampas reirradiantes

### Cilindro Infinito

Jotatemp - P = 1 atm - Cilindro Infinito								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	342,7	309,9	8,6	7,4	3,35	1,98	0,355	0,064
16	341,5	309,9	8,2	7,8	3,05	1,95	0,398	0,071
13	338,6	308,6	7,7	5,3	4,17	1,93	0,275	0,062
30	370,4	318,3	15,4	14,6	3,18	2,22	0,377	0,044
31	375,1	321,3	16,0	15,0	3,31	2,23	0,360	0,040
32	372,2	319,5	15,6	16,4	2,90	2,23	0,422	0,050
46	392,7	325,5	21,1	24,9	2,74	2,35	0,454	0,050
47	393,6	325,7	21,3	25,7	2,69	2,36	0,463	0,051
40	391,8	326,3	20,4	19,6	3,39	2,33	0,350	0,034
60	413,4	333,8	25,7	34,3	2,66	2,42	0,471	0,051
56	417,0	337,2	25,6	30,4	3,09	2,41	0,391	0,036
59	414,6	335,9	25,2	33,8	2,70	2,41	0,461	0,049

Tabela 6.10: Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 1 atm - Hipótese dos cilindros infinitos

Jotatemp - P = 0,5 atm - Cilindro Infinito								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	351,0	311,8	6,8	9,2	3,38	1,31	0,351	0,053
16	349,2	311,9	6,4	9,6	3,06	1,29	0,396	0,061
16	349,1	310,3	6,5	9,5	3,19	1,30	0,376	0,057
31	379,5	320,2	11,4	19,6	2,83	1,45	0,435	0,049
33	377,8	317,1	11,8	21,2	2,63	1,46	0,477	0,057
32	381,8	321,6	11,6	20,4	2,81	1,45	0,440	0,050
44	402,8	326,8	15,5	28,5	2,84	1,53	0,433	0,045
46	405,1	329,3	15,3	30,7	2,68	1,52	0,465	0,050
45	401,5	324,5	15,8	29,2	2,77	1,54	0,447	0,047
60	427,1	334,0	19,7	40,3	2,81	1,59	0,440	0,044
62	424,3	333,7	19,0	43,0	2,53	1,58	0,502	0,056
61	429,0	337,9	19,0	42,0	2,69	1,57	0,463	0,048

Tabela 6.11: Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 0,5 atm - Hipótese dos cilindros infinitos

Jotatemp - P = 0,03 atm - Cilindro Infinito								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
14	353,6	314,3	3,4	10,6	3,01	0,65	0,404	0,059
16	350,9	313,6	3,2	12,8	2,33	0,65	0,557	0,088
16	355,4	312,8	3,7	12,3	2,82	0,65	0,438	0,061
32	383,3	322,1	5,5	26,5	2,22	0,68	0,594	0,082
30	380,4	320,4	5,4	24,6	2,30	0,67	0,567	0,076
32	383,8	321,5	5,6	26,4	2,27	0,68	0,577	0,077
47	408,6	329,1	7,5	39,5	2,22	0,70	0,593	0,078
48	411,6	329,3	8,5	39,5	2,33	0,70	0,557	0,069
43	408,0	329,7	7,3	35,7	2,42	0,70	0,531	0,064
59	429,4	336,8	9,0	50,0	2,29	0,73	0,568	0,071
62	431,0	336,5	9,2	52,8	2,23	0,73	0,589	0,076
62	432,2	336,5	9,3	52,7	2,27	0,73	0,575	0,072

Tabela 6.12: Emissividade do Jotatemp1000 à pressão de 0,03 atm - Hipótese dos cilindros infinitos

**Aço Naval****Tampas Reirradiantes**

Aço - P = 1 atm - Tampas Reirradiantes								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	351,0	314,9	9,7	6,3	48,11	2,01	0,254	0,050
14	350,4	314,4	9,7	4,3	69,94	2,01	0,166	0,043
18	349,2	312,9	9,8	8,2	36,54	2,02	0,353	0,060
31	379,0	323,4	16,6	14,4	38,17	2,24	0,335	0,038
34	380,5	322,9	17,4	16,6	34,46	2,27	0,380	0,043
29	376,6	319,8	17,2	11,8	46,40	2,27	0,265	0,031
44	404,7	330,9	23,5	20,5	41,03	2,39	0,307	0,028
42	402,8	331,1	22,6	19,4	41,81	2,37	0,300	0,027
43	400,8	329,2	22,7	20,3	39,27	2,38	0,323	0,030
61	425,3	337,3	29	32	35,04	2,47	0,372	0,034
59	424,4	337,9	28,3	30,7	35,84	2,46	0,362	0,032
57	425,9	335,6	30	27	42,46	2,49	0,294	0,023

Tabela 6.13: Emissividade do aço naval à pressão de 1 atm - Hipótese das tampas reirradiantes

Aço - P = 0,5 atm - Tampas Reirradiantes								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	359,1	316,7	7,5	8,5	43,82	1,32	0,283	0,044
11	351,9	315,0	6,3	4,7	66,22	1,28	0,176	0,043
16	357,8	315,0	7,6	8,4	44,17	1,33	0,281	0,044
32	391,2	323,9	13,3	18,7	37,64	1,49	0,340	0,034
32	391,8	325,8	13	19	36,70	1,47	0,351	0,036
32	391,3	323,8	13,4	18,6	37,96	1,49	0,337	0,034
46	414,2	330,5	17,3	28,7	34,58	1,55	0,378	0,036
44	412,6	330,8	16,8	27,2	35,45	1,54	0,367	0,034
43	413,7	330,2	17,3	25,7	38,40	1,55	0,332	0,029
62	438,1	339,7	20,9	41,1	32,45	1,59	0,410	0,039
60	438,5	339,6	21	39	34,42	1,60	0,380	0,034
62	441,5	340,6	21,5	40,5	34,35	1,60	0,381	0,034

Tabela 6.14: Emissividade do aço naval à pressão de 0,5 atm - Hipótese das tampas reirradiantes

Aço - P = 0,03 atm - Tampas Reirradiantes								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	353,7	314,0	3,4	12,6	26,68	0,65	0,529	0,084
13	349,0	311,5	3,2	9,8	31,36	0,64	0,428	0,070
13	349,9	307,7	3,6	9,4	36,34	0,64	0,355	0,055
28	391,2	319,9	6,5	21,5	34,15	0,68	0,384	0,040
31	392,4	323,4	6,3	24,7	29,32	0,69	0,467	0,054
31	393,9	324,1	6,4	24,6	30,06	0,69	0,452	0,051
41	412,7	325,0	8,2	32,8	30,86	0,70	0,437	0,045
48	412,9	325,3	8,2	39,8	25,45	0,70	0,565	0,072
48	416,7	325,6	8,6	39,4	27,21	0,71	0,516	0,060
64	444,5	335,1	10,7	53,3	28,11	0,74	0,494	0,054
60	446,2	340,9	10,4	49,6	29,87	0,74	0,456	0,047
63	446,9	335,9	10,9	52,1	29,56	0,74	0,462	0,048

Tabela 6.15: Emissividade do aço naval à pressão de 0,03 atm - Hipótese das tampas reirradiantes

### Cilindro Infinito

Aço - P = 1 atm - Cilindro Infinito								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	351,0	314,9	9,7	6,3	4,61	2,01	0,245	0,046
14	350,4	314,4	9,7	4,3	6,70	2,01	0,162	0,042
18	349,2	312,9	9,8	8,2	3,50	2,02	0,337	0,055
31	379,0	323,4	16,6	14,4	3,66	2,24	0,320	0,034
34	380,5	322,9	17,4	16,6	3,30	2,27	0,361	0,039
29	376,6	319,8	17,2	11,8	4,44	2,27	0,256	0,029
44	404,7	330,9	23,5	20,5	3,93	2,39	0,294	0,025
42	402,8	331,1	22,6	19,4	4,00	2,37	0,288	0,025
43	400,8	329,2	22,7	20,3	3,76	2,38	0,310	0,027
61	425,3	337,3	29,0	32,0	3,35	2,47	0,354	0,030
59	424,4	337,9	28,3	30,7	3,43	2,46	0,345	0,029
57	425,9	335,6	30,0	27,0	4,07	2,49	0,283	0,021

Tabela 6.16: Emissividade do aço naval à pressão de 1 atm - Hipótese dos cilindros infinitos

Aço - P = 0,5 atm - Cilindro Infinito								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	359,1	316,7	7,5	8,5	4,20	1,32	0,273	0,040
11	351,9	315,0	6,3	4,7	6,34	1,28	0,172	0,041
16	357,8	315,0	7,6	8,4	4,23	1,33	0,271	0,040
32	391,2	323,9	13,3	18,7	3,60	1,49	0,326	0,031
32	391,8	325,8	13,0	19,0	3,51	1,47	0,335	0,032
32	391,3	323,8	13,4	18,6	3,63	1,49	0,322	0,030
46	414,2	330,5	17,3	28,7	3,31	1,55	0,360	0,032
44	412,6	330,8	16,8	27,2	3,39	1,54	0,349	0,030
43	413,7	330,2	17,3	25,7	3,68	1,55	0,318	0,026
62	438,1	339,7	20,9	41,1	3,11	1,59	0,389	0,034
60	438,5	339,6	21,0	39,0	3,30	1,60	0,362	0,030
62	441,5	340,6	21,5	40,5	3,29	1,60	0,363	0,030

Tabela 6.17: Emissividade do aço naval à pressão de 0,5 atm - Hipótese dos cilindros infinitos

Aço - P = 0,03 atm - Cilindro Infinito								
$Pot (W)$	$T_1 (K)$	$T_2 (K)$	$Q_c (W)$	$Q_r (W)$	$\Delta T/Q_r$	$h(W/m^2K)$	$\varepsilon_1$	$\delta\varepsilon_1$
16	353,7	314,0	3,4	12,6	2,56	0,65	0,495	0,073
13	349,0	311,5	3,2	9,8	3,00	0,64	0,405	0,062
13	349,9	307,7	3,6	9,4	3,48	0,64	0,339	0,050
28	391,2	319,9	6,5	21,5	3,27	0,68	0,365	0,035
31	392,4	323,4	6,3	24,7	2,81	0,69	0,440	0,047
31	393,9	324,1	6,4	24,6	2,88	0,69	0,426	0,045
41	412,7	325,0	8,2	32,8	2,96	0,70	0,413	0,040
48	412,9	325,3	8,2	39,8	2,44	0,70	0,525	0,062
48	416,7	325,6	8,6	39,4	2,61	0,71	0,482	0,052
64	444,5	335,1	10,7	53,3	2,69	0,74	0,463	0,047
60	446,2	340,9	10,4	49,6	2,86	0,74	0,430	0,041
63	446,9	335,9	10,9	52,1	2,83	0,74	0,435	0,042

Tabela 6.18: Emissividade do aço naval à pressão de 0,03 atm - Hipótese dos cilindros infinitos

**Comparação dos Métodos**

Comparação dos Métodos Experimentais			
Emissividade	Termógrafo	Tampas Reirradiantes	Cilindros Infinitos
$\varepsilon_{TSA}$	0,414 ± 0,029	0,404 ± 0,054	0,402 ± 0,059
$\varepsilon_{Jot}$	0,952 ± 0,015	0,697 ± 0,115	0,690 ± 0,135
$\varepsilon_{Aco}$	0,702 ± 0,039	0,546 ± 0,076	0,541 ± 0,088

Tabela 6.19: Tabela de Emissividade das Superfícies