



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA MATERIAIS

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO COEFICIENTE DE  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SUPERFÍCIES CORRUGADAS  
SOB JATOS INCIDENTES**

**JOCARLI ITAMIRÃ DUARTE ALENCASTRO**  
ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO  
MESTRE EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**TESE PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA E  
TÉCNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**  
**Novembro, 2015**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO COEFICIENTE DE  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SUPERFÍCIES CORRUGADAS SOB  
JATOS INCIDENTES**

**JOCARLI ITAMIRÃ DUARTE ALENCASTRO**  
ENGENHEIRO DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO  
MESTRE EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

ORIENTADOR: PROF. DR. ISAAC NEWTON LIMA DA SILVA

Tese realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título Doutor em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre**  
**Novembro, 2015**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

## **METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM SUPERFÍCIES CORRUGADAS SOB JATOS INCIDENTES.**

**CANDIDATO: JOCARLI ITAMIRÃ DUARTE ALENCASTRO**

Esta Tese de Doutorado foi julgada para obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

**DR. ISAAC NEWTON LIMA DA SILVA - ORIENTADOR**

### **BANCA EXAMINADORA**

**DR. CARLOS RAIMUNDO FRICK FERREIRA - DO CENTRO DE TECNOLOGIA - UFRGS**

**DRA. LETÍCIA MARIA BOLZANI POEHLIS - DO PPGEE - FENG - PUCRS**

**DR. RUBEM MÁRIO FIGUEIRÓ VARGAS - DO PGETEMA/FENG - PUCRS**

**PUCRS**

Campus Central  
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 103 - CEP: 90619-900  
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625  
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br  
www.pucrs.br/feng

*"O senhor é meu pastor e nada me faltará"*

*Salmo 23*

## DEDICATÓRIA

A dedicação deste trabalho é para aquelas pessoas com as quais sempre pude contar e que estiveram ao meu lado com palavras positivas. Como não poderia ser diferente, dedico aos meus pais, pela batalha, pela inteligência, pelo esforço e pela dedicação a todos os seus filhos. Pela poeira que juntaram e que cuspiram dos tombos na construção de seus castelos de amor e sabedoria. Com a guaiaca nua, só por vocês obtiveram seus cobres e açoitaram os rumos do vento para seguir a trote, dando exemplo de honestidade e de alegria nas trincheiras e surpresas da vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por mostrar-me o caminho ensinando-me que a persistência é a força que faz tudo rumar para o sucesso. Não importam as estradas esburacadas, nem o caminho escuro e nem as pedras espalhadas à frente, a trajetória certa constrói alicerces, que em irresistíveis, atalhos não seriam possíveis; e Deus te dá as alternativas e as condições, dentro daquilo do que você pode fazer de melhor individual e coletivamente. Planejar cada passo para a execução de cada idéia, de sucesso ou de fracasso, e trabalhar muito foram os meus lemas que serviram de motivação, promovendo pensamentos otimistas, nos momentos de dificuldade, sem deixar espaços para derrota.

Agradeço aos meus pais por todo apoio; à minha grande irmã Isabel Cristina pelas palavras de fé; ao professor Isaac Silva como meu orientador; ao professor Rubem Vargas, pelas nossas discussões construtivas; ao professor Jorge A. Villar Alé; ao técnico Gabriel Simioni; aos responsáveis pelo programa de pós graduação do PGETEMA; especialmente, a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul e a CAPES pelo financiamento da bolsa de estudos.

A toda equipe da empresa Termolar, Nelsom Nunes Machado, Luiz Alberto Moura Alimena, Luiz Quadrado, Pierre Noble, Ricardo Lange, Francisco e Airton. Coloco meus sinceros cumprimentos na execução dos trabalhos em grau de qualidade ao Julio Andrade Nunes; Roque Gallas (da empresa Gzero); Arioste; Maicon e Alex (da empresa Isoares).

A finalização da presente tese foi alcançada em cooperação com a Hewlett-Packard Brasil Ltda e com recursos provenientes da lei de informática (Lei nº 8.248, de 1991).

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	05
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	06
<b>SUMÁRIO</b> .....	07
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	10
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	15
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	16
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	17
<b>RESUMO</b> .....	19
<b>ABSTRACT</b> .....	20
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	21
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	25
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	26
<b>3.1 Condutividade térmica nos materiais</b> .....	28
<b>3.2 Materiais para isolamento térmica</b> .....	29
<b>3.3 Fatores que afetam a condutividade térmica</b> .....	33
<b>3.4 Propriedades relativas à umidade</b> .....	34
<b>3.5 Poliuretano como material de isolamento térmica</b> .....	35
3.5.1 Propriedades das espumas rígidas quanto à isolamento térmica .....	37
3.5.1.1 Tipo de gás de preenchimento .....	39
3.5.1.2 Estrutura celular, tamanho e quantidade de células .....	40
3.5.1.3 Massa específica .....	40
3.5.1.4 Anisotropia .....	42
<b>3.6 Usinabilidade do poliuretano</b> .....	43
<b>3.7 Caracterização da espuma rígida quanto à isolamento térmica</b> .....	46
3.7.1 Teste de condutividade térmica .....	47
3.7.2 Determinação da umidade .....	52
3.7.3 Massa específica .....	54
3.7.4 Determinação do conteúdo de células fechadas .....	55
<b>3.8 Processos de fabricação das espumas de poliuretano</b> .....	56

<b>3.9 Processos de transferência de calor</b> .....	58
3.9.1 Condução .....	58
3.9.1.1 Variação da condutividade térmica .....	59
3.9.1.2 Condução do calor unidimensional .....	60
3.9.2 Convecção .....	60
3.9.2.1 Camada limite cinética e camada limite térmica .....	62
3.9.2.2 Parâmetros adimensionais da convecção .....	63
3.9.2.3 Convecção Forçada .....	65
3.9.2.4 Convecção Natural .....	66
3.9.3 Radiação .....	67
<b>3.10 Jatos incidentes sobre superfícies</b> .....	69
3.10.1 Regiões características do jato .....	70
3.10.2 Classificação dos jatos .....	71
3.10.3 Correlações estudadas .....	72
3.10.4 Métodos experimentais .....	75
<b>3.11 Termografia</b> .....	77
3.11.1 Sistema óptico .....	78
3.11.2 Classificação quanto ao tipo de termografia e sensores .....	79
3.11.3 Especificações dos termovisores .....	81
3.11.3.1 Formação de imagem .....	82
3.11.3.2 Resolução espacial e distância de operação .....	82
3.11.3.3 Faixa espectral de termografia .....	84
3.11.4 Emissividade .....	85
3.11.5 Fatores ambientais que influenciam as medições .....	85
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	87
<b>4.1 Fluxograma dos procedimentos</b> .....	88
<b>4.2 Amostras para ensaio</b> .....	89
4.2.1 Escolha da geometria das amostras .....	90
4.2.2 Confeção das amostras .....	92
<b>4.3 Projeto da estrutura para os experimentos</b> .....	94
4.3.1 Etapas da implementação .....	97
4.3.2 Observações de construção .....	99
4.3.3 Desenvolvimento e automação dos experimentos .....	101
4.3.3.1 Supervisório .....	102



4.3.3.2 Potência e aquecimento .....	104
4.3.3.3 Sensoriamento.....	105
4.3.3.4 Controle de velocidade e temperatura.....	107
4.3.3.5 Aquisição das curvas de velocidade.....	108
<b>4.4 Procedimentos experimentais .....</b>	<b>110</b>
4.4.1 Medidas de densidade e umidade das amostras.....	111
4.4.2 Análise das amostras submetidas ao experimento.....	112
4.4.3 Medições de temperatura com termovisor.....	113
4.4.4 Medida de potência e taxa de perda de calor na superfície da placa .....	115
4.4.5 Procedimentos e cálculos em convecção .....	117
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>119</b>
<b>5.1 Projeto final e características gerais .....</b>	<b>120</b>
5.1.1 Fechamento das câmaras.....	122
5.1.2 Curvas das velocidades utilizadas .....	125
5.1.3 Controle de temperatura .....	126
<b>5.2 Massa e espessura das amostras.....</b>	<b>128</b>
<b>5.3 Correlações entre Nusselt e Reynolds para placa plana.....</b>	<b>130</b>
<b>5.4 Coeficiente de convecção em função do corrugamento e velocidade.....</b>	<b>132</b>
<b>5.5 Cálculo do calor transferido através da placa.....</b>	<b>135</b>
<b>5.6 Correlações entre Nusselt e Reynolds em função dos corrugamentos.....</b>	<b>139</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>143</b>
<b>7. TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>144</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>145</b>
<b>ANEXO - Fichas técnicas dos constituintes da espuma rígida de poliuretano das placas de teste .....</b>	<b>154</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Intervalos de condutividade térmica de vários materiais e temperaturas Ambiente .....	29
Figura 3.2. Representação da reação de obtenção do grupo uretano .....	36
Figura 3.3. Consumo de PU por segmento no Brasil .....	37
Figura 3.4. Condutividade térmica de diferentes agentes de expansão na fase gasosa .....	39
Figura 3.5. Relação quantidade de células x densidade para mesmo volume.....	40
Figura 3.6. Variação da densidade com condutividade térmica da espuma rígida de poliuretano.....	41
Figura 3.7. Percentual de participação do processo de troca térmica com densidade .....	41
Figura 3.8. Anisotropia da espuma do poliuretano .....	42
Figura 3.9. Anisotropia da espuma de poliuretano x isolamento e número de células .....	43
Figura 3.10. Equipamento para usinagem de poliuretano flexível.....	44
Figura 3.11. Mapa de seleção de rotações e avanços para espumas flexíveis .....	45
Figura 3.12. Qualidade de usinagem em diferentes rotações conforme ferramenta e sentido de usinagem .....	46
Figura 3.13. Possíveis arranjos para o método fluximétrico .....	48
Figura 3.14. Sistema de placa quente protegida determinação da condutividade térmica do poliuretano norma NBR 12094 .....	49
Figura 3.15. Configuração de ensaio placa quente protegida segundo norma NBR 15220-4.....	50
Figura 3.16. Aparato de secagem de amostras de poliuretano NBR 6578 .....	53
Figura 3.17. Aparato para determinação de células fechadas NBR 11620.....	55
Figura 3.18. Aplicações de poliuretano com outros materiais (A) e (D) Perfilados para telhado e paredes (B) Perfilados para containers e (A) Superfície perfilada para isotérmico .....	57
Figura 3.19. Condutividade térmica dos materiais x temperatura .....	59
Figura 3.20. Condução de calor unidimensional em uma chapa fina .....	60
Figura 3.21. Camada limite cinética .....	62

Figura 3.22. Camada limite térmica.....	63
Figura 3.23. Desenvolvimento da camada limite para escoamento ao longo de uma placa plana e os diferentes regimes de escoamento.....	65
Figura 3.24. Aumento da temperatura devido ao aumento da energia cinética no canto de ângulo reto superior do corpo rombudo .....	66
Figura 3.25. Fluido próximo a superfície em convecção natural .....	67
Figura 3.26. Dispersão da radiação incidente .....	68
Figura 3.27. Regiões do jato incidente: 1- Núcleo potencial, 2- Região de jato livre, 3- Região de deflexão ou de estagnação e 4- Região de parede livre ..	70
Figura 3.28. Diagrama esquemático a) jatos não confinados e b) jatos confinados..	72
Figura 3.29. Configuração de ensaio com jato confinado com ar pressurizado .....	75
Figura 3.30. Configuração de ensaio de jato não confinado com ar pressurizado ....	76
Figura 3.31. Configuração de ensaio com jato confinado e ventilador centrífugo .....	76
Figura 3.32. Configuração de ensaio de jato confinado com ar pressurizado .....	77
Figura 3.33. Sistema de funcionamento de um termovisor .....	79
Figura 3.34. Diagrama de classificação em termografia .....	80
Figura 3.35. Campo de visão (FOV) e campo de visão instantâneo (IFOV) de um termovisor.....	83
Figura 4.1. Diagrama explicativo dos procedimentos.....	88
Figura 4.2. Bloco de poliuretano em corte por serra fita horizontal .....	89
Figura 4.3. Altura de retirada da chapa para confecção das amostras de teste .....	90
Figura 4.4. Esquema das geometrias das superfícies das amostras nomeadas de 'a a f' com dimensões representadas em mm .....	91
Figura 4.5. Esquema dimensional das amostras em (a), processo de usinagem na fabricação das placas e em (b), amostras confeccionadas com as devidas geometrias (c) .....	93
Figura 4.6. Esquema das câmaras com os blocos de isopor e com posicionamento de sensores e janelas de inspeção das câmaras circulantes de ar quente e frio .....	95
Figura 4.7. Esquema da estrutura mecânica da metodologia com as câmaras e acondicionamento de amostras em estrutura de MDF e estrutura metálica .....	96

Figura 4.8. Usinagem (a); teste de encaixes no isopor e montagem (b), (c), (d) e (e); envolvimento com película termo retrátil (f), (g) e (h) ; etapas de montagem em (i),(j)e (l) .....	99
Figura 4.9. Encaixe de amostra em (a) e (b); sistema de fechamento com parafusos (c); sistema de retirada das amostras de teste (d), sistema de saída de ar (e); amostra vista pelo lado de dentro da câmara circulante (d).....	101
Figura 4.10. Diagrama de blocos explicativo do funcionamento de eletrônica e software supervisor.....	102
Figura 4.11. Esquema de software supervisor .....	103
Figura 4.12. Resistência e ventilador utilizados no aquecimento da câmara circulante com adaptadores .....	104
Figura 4.13. Resistência utilizada no acondicionamento das amostras .....	105
Figura 4.14. Disposição dos sensores na estrutura .....	106
Figura 4.15. Diagrama de blocos explicativo do funcionamento de controle de resistência e motor .....	107
Figura 4.16. Peças para adaptação da turbina.....	108
Figura 4.17. Protótipo de desenvolvimento de eletrônica e controle de temperatura e velocidade do ar, com as mesmas condições de volume de ar da câmara da estrutura para experimentos.....	109
Figura 4.18. Posições de medida de velocidades com tubo de Pitot e manômetros Digitais.....	110
Figura 4.19. Aferição de massa e espessura das amostras.....	111
Figura 4.20. Espaçador de espuma de EVA .....	113
Figura 4.21. Janela de inspeção para termovisor para câmara fria e câmara circulante de ar quente .....	114
Figura 4.22. Área de inspeção para obter temperatura média com software INSIDE IR do termovisor .....	115
Figura 4.23. Perfil de placa frisada com equivalência em perfil retangular .....	116
Figura 5.1. Estrutura completa em modo de funcionamento de teste .....	120
Figura 5.2. Principais dimensões das duas câmaras fechadas: 1- Acondicionamento da turbina,2- Acondicionamento da resistência, 3- Janela de inspeção, 4- Placa de teste, 5- Admissão de ar frio de ambiente refrigerado com ar condicionado .....	121

Figura 5.3. Análise da variação de temperatura no encaixe entre as câmaras, vistas no segmento A-B. Onde: a) Segmento A-B em que foi retirada imagem termográfica; b) Segmento A-B com imagem termográfica; c) Segmento A-B com oscilações de temperatura devido ao controle de ar condicionado .....	123
Figura 5.4. Espaçador de EVA mostrando marca da compressão entre as câmaras.....	124
Figura 5.5. Perfil de velocidade média a 70 mm da placa.....	126
Figura 5.6. Transitório e permanente do controle de temperatura na câmara circular de ar quente.....	127
Figura 5.7. Transitório e permanente da estabilização da temperatura na câmara Fria .....	128
Figura 5.8. Curva da relação entre Nusselt e Reynolds para placa plana.....	131
Figura 5.9. Variação do coeficiente de convecção para cada corrugamento na primeira velocidade .....	133
Figura 5.10. Variação do coeficiente de convecção para cada corrugamento na segunda velocidade.....	134
Figura 5.11. Variação do coeficiente de convecção para cada corrugamento na terceira velocidade .....	134
Figura 5.12. Variação do coeficiente de convecção para cada corrugamento na quarta velocidade .....	134
Figura 5.13. Variação do coeficiente de convecção para cada corrugamento na quinta velocidade.....	135
Figura 5.14. Variação do calor transferido em função da corrugamento para primeira velocidade .....	137
Figura 5.15. Variação do calor transferido em função da corrugamento para segunda velocidade.....	137
Figura 5.16. Variação do calor transferido em função da corrugamento para terceira velocidade .....	137
Figura 5.17. Variação do calor transferido em função da corrugamento para quarta velocidade .....	138
Figura 5.18. Variação do calor transferido em função da corrugamento para quinta velocidade.....	138

Figura 5.19. Curva da relação entre Nusselt e Reynolds para placa triangular .....	140
Figura 5.20. Curva da relação entre Nusselt e Reynolds para placa ond.p/cima ....	140
Figura 5.21. Curva da relação entre Nusselt e Reynolds para placa ond.p/baixo ...	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Massa específica e condutividade térmica de isolantes .....	32
Tabela 3.2. Resfriamento do ar e ponto de orvalho .....	35
Tabela 3.3. Resistência mecânica de espuma de poliuretano de 32 kg/m <sup>3</sup> .....	39
Tabela 3.4. Fator de correção para uma placa vertical .....	86
Tabela 4.1. Massa em gramas das placas relacionadas à placa plana .....	92
Tabela 4.2. Área da face lateral do perfil geométrico e sua espessura equivalente .....	117
Tabela 5.1. Velocidade na saída do bocal a 70 mm da superfície da placa.....	125
Tabela 5.2. Velocidades médias escolhidas para os experimentos .....	127
Tabela 5.3. Aferições de massa e espessura antes do acondicionamento.....	128
Tabela 5.4. Aferições de massa após acondicionamento e espessura após o teste ...	129
Tabela 5.5. Diferenças das variação de massa e dimensões de espessura em quatro pontos .....	129
Tabela 5.6. Resultado médios de três experimentos para placa plana para cada velocidade .....	131
Tabela 5.7. Coeficiente de convecção para cada velocidade e cada corrugamento, com valores de velocidades conforme visto na Tabela 5.2 .....	133
Tabela 5.8. Variação da transferência de calor em função da geometria e da velocidade .....	136
Tabela 5.9. Condições de contorno e cálculos para placa triangular .....	139
Tabela 5.10. Condições de contorno e cálculos para placa ondulada para cima...	139
Tabela 5.11. Condições de contorno e cálculos para placa ondulada para baixo..	140

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1. Tipos de materias isolantes .....	31
Quadro 3.2. Condutividade térmica e tipos de regime de teste.....	52
Quadro 3.3. Processos de fabricação, características e aplicações da espuma rígida .....	56
Quadro 3.4. Variáveis que interferem no coeficiente de convecção.....	61
Quadro 3.5. Coeficientes adimensionais .....	64
Quadro 3.6. Expoente entre Nusselt e Reynolds e configurações de experimento...	74
Quadro 3.7. Características importantes de um termovisor .....	81
Quadro 3.8. Comprimento de onda e aplicações .....	84
Quadro 3.9. Fatores ambientais e sua influência em termografia .....	86
Quadro 4.1. Características dos sensores utilizados .....	106
Quadro 4.2. Variáveis medidas armazenadas e calculadas no uso do dispositivo ....	111
Quadro 4.3. Comprimento característico segundo geometria da placa.....	118



## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da superfície que participa do processo de transferência de calor	m <sup>2</sup>
a	Porcentagem de absorção de água por área	
D <sub>cp</sub>	Massa específica aparente do corpo de prova	kg/m <sup>3</sup>
$\bar{D}$	Média aritmética das massas específicas dos corpos de prova	
D <sub>ob</sub>	Tamanho do objeto sob inspeção	m
D	Diâmetro do bocal	m
D <sub>i</sub>	Massa específica inicial do corpo de prova	kg/m <sup>3</sup>
Dist <sub>d</sub>	Distância máxima de um objeto	m
EVA	Espuma vinílica acetinada	
ESC	Controle de velocidade do motor	
$\varepsilon$	Emissividade	
FOV	Campo de visão	
FIR	Espectro eletromagnético longe	
H	Distância da placa ao bocal	m
h	Constante de Planck = $6,6260755 \cdot 10^{-34}$	J.s
$h_x$	Coeficiente de convecção	W/m <sup>2</sup> .K
IFOV	Campo de visão instantâneo	mrad
K	Condutividade térmica	(W/m.K)
L	Distância entre as superfícies 1 e 2	m
L <sub>c</sub>	Comprimento característico	m
MDF	Medium density Fiberboard	
M	Massa do corpo de prova	kg
M <sub>f</sub>	Massa final	g
M <sub>i</sub>	Massa inicial	g
MIR	Espectro eletromagnético médio	
MIFOV	Campo de visão instantâneo de medida	
N	Número de corpos de prova medidos	

NIR	Espectro eletromagnético próximo	
PVC	Policloreto de vinila	
$Nu_x$	Número de Nusselt	
Pix	Número de pixels	
PU	Espuma rígida de poliuretano	
Q	Taxa de transferência de calor	W
R11	Gás refrigerante	
R	Resistência térmica	$m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$
RIM	Moldagem por injeção e reação	
S	Desvio padrão estimado	
T	Temperatura absoluta do corpo negro	K
V	Volume do corpo de prova	$m^3$
PI	Proporcional Integral	
PWM	Modulação por largura de pulso	
PPM	Modulação por posição de pulso	
x	Distância radial para jato incidente	m
$\Delta T$	Diferença de temperatura	$^\circ\text{C}$
$\sigma$	Constante de Stefan- Boltzmann = $5,67051 \cdot 10^{-8}$	$W \cdot m^{-2} \cdot k^{-4}$

## RESUMO

ALENCASTRO, Jocarli. **Metodologia para análise do coeficiente de transferência de calor em superfícies corrugadas sob jatos incidentes**. Porto Alegre. 2015. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

A proposta do presente trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção forçada, sob a forma de jatos incidentes aquecidos em superfícies corrugadas de chapas de espuma rígida de poliuretano, com possibilidades de quantificação do calor transmitido. Foram confeccionadas seis geometrias diferentes, mas com mesma largura e altura de cristas. Paralelamente projetou-se uma estrutura para realização de experimentos com uma condição de circulação de ar quente, com temperatura e velocidade do ar controladas, e outra condição de circulação de ar frio, com temperatura controlada. Utilizando-se o ar quente por convecção forçada os perfis escolhidos, da superfície das placas, foram analisados através de sensores e termografia. Considerou-se regime permanente e transmissão de calor no sentido unidimensional para o estudo. O monitoramento dos ensaios foi realizado através de programa supervisorio com leitura de medições de temperatura a cada segundo e com armazenamento final de 14.400 pontos, totalizando quatro horas para cada teste. Com a simulação experimental e com os dados obtidos por informações automatizadas e imagens termográficas, a metodologia desenvolvida pode determinar de forma aproximada o coeficiente de convecção e correlações de Nusselt e Reynolds para diferentes corrugamentos em placas para cinco variações de velocidade de entrada de ar quente

**Palavras-chave:** Jatos incidentes. Metodologia. Corrugamento superficial.

## ABSTRACT

ALENCASTRO, Jocarli. **Methodology for the analysis of heat transfer coefficient on incident surfaces corrugated jets**. Porto Alegre. 2015. Thesis Pos Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The purpose of this work is the development of a methodology to determine the heat transfer coefficient by forced convection in the form of incident jets heated in corrugated surfaces sheets of rigid polyurethane foam with the possibility of quantifying the transmitted heat. They were prepared six different geometry but with the same ridge width and height. At the same time we designed a structure for conducting experiments with a hot air circulation condition with temperature and speed controlled air and other cold air circulation condition with controlled temperature. Using hot air by forced convection of the surface profiles of selected plates were analyzed by sensors and thermography. It was considered steady and heat transfer in one-dimensional direction for the study, monitoring of trials was conducted by supervisory program with reading temperature measurements every second and final storage of 14,400 points, a total of four hours for each test. With the simulation and experimental data from automated thermographic images information and this methodology can determine roughly the convection coefficient and Nusselt correlations and for different Reynolds corrugated plates for five variations in hot air inlet speed.

**Keywords:** Jets incidents. Methodology. Corrugated surfaces.

## 1. INTRODUÇÃO

As modernas ferramentas de pesquisas científicas tornaram possível a determinação de estruturas moleculares em polímeros e o desenvolvimento de inúmeros tipos dessa estrutura que são sintetizados a partir de moléculas orgânicas pequenas. Desde o término da Segunda Guerra Mundial o campo de materiais foi virtualmente revolucionado pelo advento de polímeros sintéticos. Muitos plásticos, borrachas e materiais fibrosos, que nos são úteis, são polímeros sintéticos (CALLISTER, 2013).

Também existem os polímeros naturais, como a madeira, o algodão, o couro e a lã. Os sintéticos são produzidos a partir de reações químicas conhecidas como polimerização, como o polipropileno (PP), o polietileno (PE), o politereftalato de etileno (PET), o policloreto de vinila (PVC), entre outros, (SPINACÉ, 2005). Atualmente, vários materiais naturais vêm sendo substituídos por sintéticos, devido ao custo de produção ser baixo e às propriedades poderem ser facilmente manipuladas durante o processo de formação (ALVES, 2005).

Em 1937, o professor Otto Bayer e a sua equipe desenvolveram um processo que, a partir da reação de dois compostos, resultou em um produto de estrutura macromolecular chamado de Poliuretano.

Nessas espumas há duas variantes principais: uma na qual a maior parte das “bolhas” da espuma, células, permanecem fechadas e o gás preso nas bolhas e outra que são sistemas que têm em sua maioria células abertas, que depois resultam num estágio crítico no processo de formação da espuma. No primeiro caso o que dá à espuma sua característica principal é a alta isolamento térmica e no segundo caso é a flexibilidade para fabricação de colchões. Existe ainda uma terceira variante de espuma chamada de espuma microcelular que são os materiais elastoméricos que são rígidos e tipicamente encontrados nos revestimentos de volantes de automóveis e em outros componentes automotivos, <http://www.metlica.com.br/poliuretano>.

A espuma de poliuretano dentre os isolantes conhecidos é o material com menor condutividade térmica e quanto maior o número de poros maior a presença de gases em seus vazios, o que impede a transferência de calor (BEZERRA, 2003).

Além do uso como isolante, devido a sua baixa condutividade térmica, apresenta excelente resistência mecânica e baixa densidade, tendo aplicações em preenchimento de cascos de barcos, pisos, telhas, fabricação de assentos e maquetes utilizadas em projetos de arquitetura, em que esses materiais podem ser montados, colados e usinados.

Segundo Dhokia et al. (2008) há pouco conhecimento de parâmetros de usinagem para polímeros. Trabalhos realizados por Silva (2011) no estudo de assentos em espuma flexível apresentaram a viabilidade de usinagem direta de espumas por equipamentos convencionais apresentando maior viabilidade do que a fabricação de um molde para fabricar a mesma peça.

A usinabilidade das espumas rígidas de poliuretano comparada às espumas flexíveis pode ser melhorada devido a maior rigidez e a maior facilidade de fixação na mesa de usinagem. Estudos realizados por Jaramillo (2011) quanto à usinagem desse material, indicam que o mesmo possui a capacidade de bom acabamento superficial utilizando parâmetros adequados de usinagem.

A facilidade de usinagem desse material observada no presente trabalho tornou possível a fabricação de corpos de prova e flexibilizou o estudo de transferência de calor por convecção forçada sob jatos incidentes em superfícies corrugadas.

A obtenção do número de Nusselt, para quaisquer geometrias superficiais, e sua correlação com as variações do número de Reynolds por um método experimental são de grande valia. Pois em problemas de transferência de calor quando não se conhece a energia fornecida ao sistema, essas correlações são fundamentais. No estudo da transferência de calor, em superfície de sólidos, as relações das variações do coeficiente convectivo com a velocidade são parâmetros importantes a serem determinados, pois a geometria superficial pode alterar de forma significativa a transferência de calor, modificando zonas de pressão e velocidade do ar. Em estudos de convecção forçada por jatos incidentes geralmente são realizadas análises de transferência de calor para placas em aço previamente aquecidas, com intuito de realizar estudos para uma melhor condição de resfriamento em aplicações industriais, como: secagem de papel e tecido,

aquecimento e resfriamento de metais, produção de vidros temperados, resfriamento localizado de componentes eletrônicos de alta potência e resfriamento de palhetas de turbinas (PINTO et al., 2005).

Os primeiros estudos sobre jatos incidentes foram realizados por Glauert (1956) em que se teve conhecimento dos tipos diferentes de escoamento entre as regiões de turbulência e a região de parede. E por Bakke (1957) no qual se observou que a mudança de velocidade e a espessura do jato podem ser expressas por leis de potência.

Mais tarde, trabalhos citados por Martin (1977) e por Downs e James (1987) investigaram vários aspectos que influenciam a troca de calor ou de massa por jatos incidentes, considerando os geométricos: diâmetro do bocal, forma de seção transversal do jato, ângulo de incidência do jato, curvatura da superfície da placa, rugosidade da superfície, comprimento da placa e espessura da região de expansão do jato; além dos não geométricos: número de Reynolds, temperatura na superfície da placa, temperatura na entrada do fluido e a intensidade de turbulência inserida no escoamento.

Em estudos sobre jatos incidentes, há um grande interesse em determinar as correlações entre Reynolds e Nusselt, sendo geralmente direcionadas a estudos que visam uma melhor eficiência no resfriamento de placas de aço previamente aquecidas. No entanto, não existem estudos para analisar a influência de convecção forçada em jatos incidentes com direcionamento a análises sob a óptica de otimização da menor troca de calor em função de superfícies rugosas. Foram encontradas correlações entre Nusselt e Reynolds para as rugosidades superficiais estudadas e avaliou-se o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada e seus efeitos para o calor transportado através da placa, tendo como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia que flexibilizasse o estudo dessas rugosidades através de convecção forçada por jatos incidentes.

Métodos computacionais podem apresentar grande dificuldade em resolver problemas com geometrias complexas e não linearidades e, também, não se pode obter soluções numéricas para problemas que não possuam uma modelagem matemática adequada (CARVALHO, 2001). A complexidade das soluções analíticas e as dificuldades encontradas com métodos computacionais, nos processos de transferência de calor justificam a grande importância em desenvolver e aprimorar métodos na forma experimental (ESCUADERO, 2012).

Em vista das necessidades e dificuldades, o desenvolvimento da metodologia teve como parâmetros base as normas NBR 12094 e NBR 15220-4, considerando da análise de regime permanente e sentido unidimensional de transmissão do calor. Adicionando-se também os métodos para estudo de jatos incidentes na considerando a relação entre distância placa-bocal, buscando validar a metodologia para uma placa plana.

Diferentemente de um teste para determinação do coeficiente de condutividade térmica, no qual a transferência de calor ocorre pelo contato entre uma placa quente e outra fria, a transferência de calor nas placas será realizada pelo aquecimento da superfície dela, por ar quente. E, também, diferentemente dos estudos por jatos incidentes em que ocorre a variação de distanciamento entre placa bocal e formato do bocal, tais parâmetros serão fixados, ocorrendo apenas a investigação relativa ao impacto dos corrugamentos das superfícies das placas no transporte de calor. Apesar dessa metodologia apresentar orientações nas normas NBR 12094 e NBR 15220-4, será focado o estudo de jatos circulares desenvolvidos de ar incidente em confinamento e com temperatura e velocidade do jato de ar quente controladas, tornando possível avaliar as variações do coeficiente de transferência de calor convectivo para diferentes corrugamentos das superfícies de placas e seu impacto na transferência de calor através do sistema.



## 2. OBJETIVOS

- a) Desenvolver uma metodologia para estudo de transferência de calor por convecção forçada;
- b) Obter o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada e avaliar sua relação em função dos tipos de corrugamentos;
- c) Determinar correlações entre Nusselt e Reynolds para diferentes corrugamentos superficiais;
- d) Avaliar o efeito de diferentes corrugamentos superficiais no calor transferido através da placa.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As geometrias dos sólidos influenciam diretamente a transferência de calor por convecção (CENGEL, 2012). A aplicação dos perfis geométricos pode ser observada em muitas áreas da engenharia, podendo-se citar: chapas de revestimentos, utilizadas em caminhões frigoríficos; paredes e telhas, nas superfícies de utensílios domésticos, como caixas térmicas e garrafas térmicas; e em muitas outras aplicações nas quais os perfis superficiais ganham formas variadas e são construídos com materiais diversos. Uma metodologia que pudesse determinar de modo fácil e prático o coeficiente de convecção médio por convecção forçada, bem como as relações entre Reynolds e Nusselt para variados corrugamentos, facilitaria a escolha de um determinado tipo de superfície para uma dada aplicação em que estivesse, em que estudo a troca de calor.

Em estudos de convecção forçada sob jatos incidentes, geralmente utilizam-se placas de aço, nas quais são aderidos aos mesmos sensores de temperatura para análise térmica. Correlações entre Nusselt e Reynolds são estudadas para variadas distâncias entre placa-bocal e formato de bocais para placas previamente aquecidas. Segundo Bakke (1957) e Glauert (1956), essas correlações são expressas por lei de potência. Para vários autores, como Li e Carimella (2001) e Lin et al., (1995) as correlações apontam valores iguais ou próximos a 0,5, para o expoente de Reynolds médio com relação  $H/D$  bocal placa entre 1 e 8 para jatos confinados com escoamento sob placas planas de aço.

Segundo Martin (1977) e Downs e James (1987), os parâmetros que afetam a troca de calor ou de massa em jatos incidentes, como já comentado, estruturam-se em geométricos: diâmetro do bocal do jato, distância entre bocal do jato e a placa, forma da seção transversal do jato, ângulo de incidência do jato, curvatura da superfície da placa, comprimento da placa espessura da região de expansão do jato e rugosidade superficial. E, não geométricos, como número de Reynolds, temperatura da placa, temperatura da entrada do fluido, e intensidade de turbulência

do escoamento em questão. Segundo Huang (1994) a turbulência tem influência direta no processo de transferência de calor, pois na maior turbulência ocorre a máxima transferência de calor que pode ser gerada por diferentes corrugamentos.

Nas metodologias realizadas em estudos de jatos incidentes não há quantificação direta do calor transferido através de uma placa de teste no momento do teste sem utilização de cálculos posteriores, pois eles não contemplam um isolamento entre ambientes aquecido e não aquecido que possa proporcionar esse tipo de análise. Também fazem uso de sensores de temperatura acoplados às placas, nas quais os jatos incidem, tornando a análise térmica dependente também da massa do sensor. Obter, portanto, versatilidade para estudar variados corrugamentos superficiais utilizando-se um material de fácil usinabilidade e com baixo custo na preparação das superfícies é de grande importância.

Estudos realizados por Brienza et al. (1992) sobre espumas flexíveis apresentaram que o maior problema na usinagem da espuma flexível de poliuretano era o desprendimento da mesa de usinagem com isso Olari e Allen (2004) descobriram um método de tornar a espuma flexível rígida para facilitar a usinagem. Esse princípio sugeriu a utilização de espuma rígida de poliuretano para o desenvolvimento da metodologia no presente trabalho.

Uma estrutura foi construída com câmaras isoladas de ar aquecido e não aquecido, separadas pelo corpo de prova, no caso a placa com as superfícies escolhidas entre elas: corrugadas e planas. Nas configurações para determinação da condutividade térmica de materiais sólidos granulares e isolantes em modo permanente expressas por Simioni (2005) está o método da placa quente protegida descritas pelas normas NBR 12094 e NBR 15220-4 com características como: acondicionamento em temperatura controlada para as amostras, espessura e formato das amostras, variação de temperatura entre as duas faces da placa, teste realizado em modo permanente e condução unidimensional de calor. Considerando essas condições a metodologia foi desenvolvida, com diferencial de obter-se um coeficiente de convecção médio da superfície corrugada sob os efeitos de convecção forçada.

Foi implementado controle de temperatura e velocidade do ar onde as temperaturas, nas superfícies das placas, foram adquiridas em modo permanente, depois das amostras permanecerem condicionadas em temperatura controlada por

24h. As temperaturas das superfícies das placas foram medidas com termovisor, livre, portanto, da massa de sensores posicionados nas superfícies das mesmas.

### **3.1 Condutividade térmica nos materiais**

A taxa de condução de calor, através de um meio, depende da geometria, espessura, tipo de material e da diferença de temperatura a que o meio está submetido (CENGEL, 2012). A condutividade térmica de uma substância é normalmente maior na fase sólida e menor na fase gasosa. Diferentemente dos gases a condutividade térmica da maioria dos líquidos decresce com o aumento da temperatura, sendo com a água uma notável exceção. Como nos gases, a condutividade térmica dos líquidos decresce com o aumento da massa molar. Metais líquidos como o mercúrio e o sódio possuem alto valor de condutividade e são bastante adequados para o uso em aplicações em que uma alta taxa de transferência de calor para um líquido é desejada, como acontece em usinas nucleares.

Nos sólidos, a condução de calor é consequência de dois efeitos: as ondas de vibração de rede, motivadas pelos movimentos vibracionais das moléculas arrançadas em posições relativamente fixas, de forma periódica, constituindo uma rede; e a energia transportada através do movimento livre dos elétrons presentes nos sólidos. A condutividade térmica de sólidos é determinada pela soma da componente de rede e da componente eletrônica. A relativamente alta condutividade térmica de metais puros é principalmente devida à componente eletrônica. A componente da rede da condutividade térmica depende fortemente de como as moléculas são arrançadas. Por exemplo, o diamante que é um sólido cristalino altamente ordenado, possui o maior valor conhecido de condutividade térmica na temperatura ambiente. Diferentemente dos metais que são bons condutores de calor e eletricidade, sólidos cristalinos como o diamante; e semicondutores, como o silício são bons condutores de calor, mas pobres condutores de eletricidade. Como resultado, tais materiais encontram ampla aplicação na indústria eletrônica (CENGEL, 2012). A Figura 3.1 mostra a variação da condutividade térmica de acordo com o tipo de material.

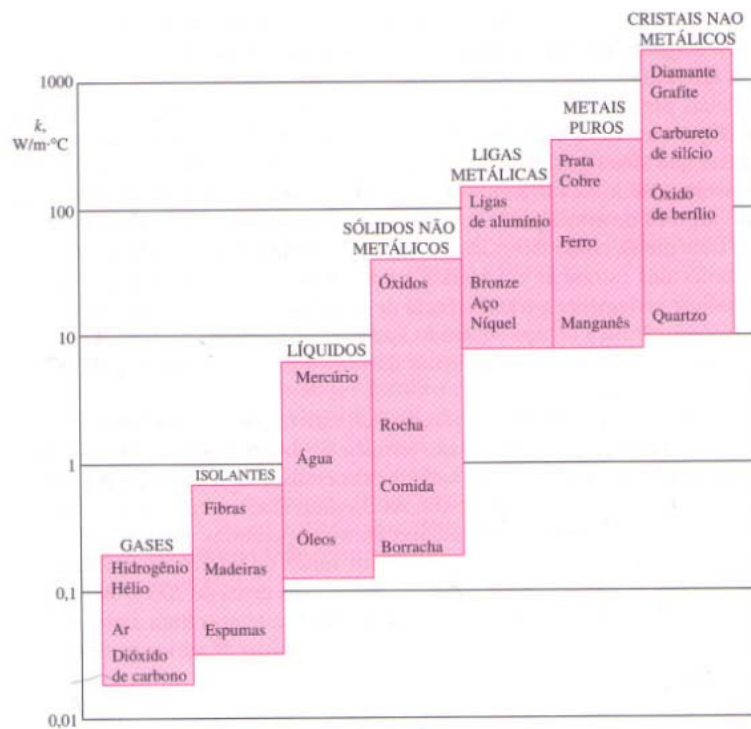


Figura 3.1. Intervalos de condutividade térmica de vários materiais e temperaturas ambiente (CENGEL, 2012)

### 3.2 Materiais para isolamento térmica

Um isolante térmico é um material onde a relação resistência térmica/espessura é significativamente superior a que pode ser obtida com materiais de construção correntes, como por exemplo: a pedra, o vidro e o material cerâmico. Um bom isolante térmico deve apresentar uma percentagem de matéria sólida, mais condutora, tão baixa quanto possível e elevada porosidade. Os materiais de isolamento, normalmente necessários numa construção convencional e essenciais numa construção leve, são porosos ou celulares, o que significa que uma grande parte do volume do material consiste em bolhas de ar ou gás (DAVIES, 2001). Assim, os melhores resultados serão obtidos com um material celular opaco, porosidade fechada, com células de dimensões reduzidas (redução dos fenômenos de convecção e radiação), preenchidas com um gás de baixa condutividade térmica.

A presença de umidade, em particular, sob a forma líquida, deve ser evitada, pois provoca um aumento das trocas térmicas (por condução e eventualmente por condensação, evaporação, difusão de vapor e escoamento líquido). Na prática, os critérios técnico-econômicos traduzidos pela relação custo/resistência térmica (após aplicação) permitem a produção e utilização de uma grande variedade de

produtos, quer celulares, quer fibrosos, apresentados sob a forma de placas, mantas, ou de materiais soltos (grânulos e fibras) com massas volumétricas diversificadas. Alguns problemas em nível tecnológico têm sido colocados aos fabricantes de alguns materiais, em consequência da necessidade de proceder à substituição de produtos prejudiciais para o ambiente, designadamente os gases de baixa condutividade térmica empregados na fabricação de alguns polímeros celulares, que podem ocasionar problemas ao meio ambiente. Segundo Torreira (1980) as propriedades ideais para que um material possa ser considerado um bom isolante térmico são:

- a) Baixo coeficiente de condutividade térmica;
- b) Boa resistência mecânica;
- c) Baixa massa específica;
- d) Incombustibilidade;
- e) Estabilidade química e física;
- f) Inércia química;
- g) Resistência física específica ao ambiente de utilização;
- h) Facilidade de aplicação;
- i) Resistência ao ataque de roedores insetos e fungos;
- j) Baixa higroscopicidade;
- k) Ausência de odor;
- l) Economicidade.

Um material com todas essas qualidades é difícil de encontrar, procura-se sempre aquele que satisfaça ao máximo cada um desses quesitos. Nisso reside a escolha de um bom isolante térmico. O Quadro 3.1 mostra os tipos de materiais isolantes existentes

Quadro 3.1. Tipos de materias isolantes (LABRINCHA, 2006)

Orgânicos		Inorgânicos		Mistos
Naturais	Sintéticos	Transformados	Não transformados	
Cortiça natural; Cortiça expandida; Partículas de madeira; Fibras de madeira; Fibras de celulose (papel, cartão); Fibras vegetais diversas	<p>Poliestireno expandido;</p> <p>Espumas rígidas de poliuretano e de poli-isocianurato;</p> <p>Espumas de areia-formaldeído;</p> <p>Poliétileno expandido;</p> <p>Espumas elastoméricas;</p> <p>Espuma rígida de cloreto de polivinilo;</p> <p>Espuma rígida fenólica; Fibras sintéticas</p>	<p>Escórias vulcânicas;</p> <p>Pedrapomes; Tufos vulcânicos</p>	<p>Fibras minerais (de vidro, de rocha e de escórias); Argila expandida; Betão celular autoclavado;</p> <p>Vermiculite expandida; Perlite expandida; Vidro celular; Xisto expandido; Ardósi a expandida</p>	<p>Grânulos de perlite expandida associados a fibras celulósicas e minerais aglutinados com betume; Fibras e partículas de madeira aglutinadas com cimento; Grânulos de cortiça envolvidos em argamassa de cimento; Grânulos de argila expandida envolvidos em betume; Betões e argamassas de inertes leves</p>

Os materiais isolantes são caracterizados por apresentarem densidades inferiores a  $150 \text{ kg/m}^3$  e uma condutividade térmica abaixo de  $0,05 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ . A Tabela 3.1 apresenta a condutividade térmica, peso específico para 5 cm de espessura de diversos tipos de materiais de isolamento. Analisando os valores, não se pode concluir de imediato qual o material mais favorável. Por exemplo, a fibra de vidro de baixa densidade apresenta limitações decorrentes da potencial periculosidade no manuseio. O seu uso não é recomendável em caixas de ar de paredes parcialmente preenchidas. Em geral é necessário a sua fixação a um suporte rígido, o que altera custos e incrementa a vulnerabilidade a alterações de condutividade por influência da umidade, ao contrário das espumas poliméricas e da cortiça que têm células fechadas.

Tabela 3.1. Massa específica e condutividade térmica de isolantes (LABRINCHA,2006)

<b>Tipo de Material</b>	<b>Massa específica (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cond. Térmica (W/m.°C)</b>
Aglomerado negro de cortiça	150-100	0.039
Espuma elastomérica	60	0,034
Lã de rocha	30-50	0,042
	51-70	0,040
	71-90	0,038
	91-120	0,038
	121-150	0.038
Lã de vidro	10-180	0,044
	19-30	0,037
	31-45	0,034
	46-65	0,033
	66-90	0,033
	91	0,036
Perlite expandida	130	0,047
Poliestireno Expandido (EPS)	10	0,057
	12	0,044
	15	0,037
	20	0,034
	25	0,033
Pol. Exp, Extrudido (XPS)	33	0,033
Polietileno Reticulado	30	0,038
Poliuretano Espuma de Moldado	32	0,023
	35	0,023
	40	0,230
	80	0,040
Poliuretano Espuma de Projetado	35	0,023
	40	0,023
Vemiculite expandida	120	0,035
Vidro celular	160	0,044



### **3.3 Fatores que afetam a condutividade térmica**

A condutividade térmica do isolante varia com a forma, estrutura física da isolação, com o ambiente e as condições de aplicação. A forma e a estrutura física variam de acordo com o material de base e com os processos de fabricação. As demais variações incluem: densidade, medida do espaço celular, diâmetro e disposição das fibras ou partículas, transparência à radiação térmica, quantidade e extensão dos materiais de ligação e do tipo e pressão do gás no interior da isolação. As condições ambientais e de aplicação que podem modificar a condutividade térmica, incluem temperatura, conteúdo de umidade, orientação da isolação e direção do fluxo de calor (TORREIRA,1980).

Para isolantes do tipo celular, a combinação específica do tamanho das células e densidade produz uma ótima condutividade térmica. A condutividade térmica em materiais porosos realiza-se através de condução do ar ou outros gases existentes no isolamento. As espumas de poliuretano possuem 90% de suas células fechadas o que permite aprisionamento do gás escolhido para preencher suas células, mas com o tempo a condutividade aumenta devido à penetração do ar nas células que irão diluir o gás.

A taxa de mudança da condutividade com a temperatura varia com o tipo de material e com a densidade, sendo que a condutividade dos materiais isolantes geralmente aumenta com a temperatura.

Além de todos os itens citados que afetam a condutividade, existem fatores que ocorrem diretamente sobre a superfície do material isolante que afetam diretamente o isolamento térmico, esses fatores são: condutância superficial, propriedade de película, retenção de calor na superfície, refletividade da superfície e umidade.

### **3.4 Propriedades relativas à umidade**

A presença de água ou gelo no isolamento térmico tem um efeito marcante sobre a condutividade. Dado que as condutividades desses elementos são várias vezes maiores que as do próprio isolante, se tem uma diminuição da isolação térmica. O efeito da umidade na condutividade do isolamento não é tão sério enquanto a umidade exista na fase de vapor; a condutividade é grandemente

afetada e obviamente aumentada pela presença de umidade condensada. Além disso, pode causar deterioração do material, como danos estruturais por putrefação ou decomposição, corrosão ou pela ação expansiva da água congelada. A umidade acumulada no interior de um isolamento térmico depende das temperaturas de operação e condições ambientais, e da efetividade das barreiras de vapor de água em relação a outras resistências de vapor no interior da estrutura composta. Alguns isolantes são higroscópicos e absorverão ou perderão umidade proporcionalmente à umidade relativa do ar em contato com o isolante. Isolantes fibrosos ou granulados permitem a transmissão de vapor de água para o lado frio da estrutura. Determinados isolantes térmicos possuem uma estrutura celular fechada, sendo relativamente impermeáveis à água e ao vapor de água (TORREIRA, 1980).

O ar para cada temperatura específica pode conter uma quantidade máxima de vapor de água. Superado esse valor, qualquer excesso não poderá ser admitido como vapor de água, produzindo-se a condensação do excedente. O valor do conteúdo máximo aumenta com a elevação da temperatura. Nas temperaturas mais altas o ar pode armazenar maior quantidade desse vapor, ou seja, para uma determinada quantidade absoluta desse vapor de água, seu valor relativo em função da saturação diminui ao aumentar a temperatura. Se fixarmos o valor absoluto do vapor de água contido no ar, a umidade relativa aumenta quando as temperaturas decrescem. A Tabela 3.2 mostra os valores do resfriamento máximo admissível para não atingir seu ponto de orvalho e está baseada em temperaturas de superfícies e umidade relativa do ar. Isso quer dizer que se uma superfície encontra-se a uma temperatura mais fria que seu ambiente exterior, conforme a proporção mostrada na Tabela 3.2, produzir-se-ão condensação de vapor de água sobre ela.

Tabela 3.2. Resfriamento do ar e ponto de orvalho (TORREIRA, 1980)

Temp. °C	Ar	Resfriamento máximo admissível do ar, para não atingir ponto de orvalho						
		Umidade Relativa						
		30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
-20			9,1	7	5,2	3,7	2,3	1,2
-15		12,3	9,6	7,3	5,4	3,8	2,5	1,2
-10		12,9	9,9	7,6	5,7	3,9	2,5	1,2
-5		13,4	10,3	7,9	5,8	4,1	2,6	1,2
0		13,8	10,7	8,1	6,1	4,3	2,7	1,2
2		14,2	11	8,5	6,4	4,6	3	1,5
4		14,7	11,5	8,9	6,7	4,9	3,2	1,5
6		15,1	11,8	9,2	7	5,1	3,2	1,5
8		15,6	12,2	9,5	7,3	5,2	3,3	1,5
10		16	12,6	9,9	7,4	5,2	3,3	1,6
12		16,5	10,1	7,5	7,5	5,3	3,4	1,6
14		16,9	13,4	10,3	7,6	5,4	3,4	1,6
16		17,4	13,6	10,4	7,7	5,5	3,5	1,6
18		17,8	13,8	10,6	7,9	5,6	3,5	1,6
20		18,1	14,1	10,8	8	5,7	3,6	1,7
25		18,9	14,6	11,2	8,3	5,9	3,7	1,8
30		19,5	15,2	11,6	8,6	6,1	3,8	1,9
35		20,2	15,7	12	9	6,3	4	1,9
40		20,9	16,1	12,4	9,3	6,5	4,1	2
45		21,6	16,7	12,8	9,6	6,8	4,3	2,1
50		22,3	17,3	13,3	9,9	7	4,4	2,1

### 3.5 Poliuretano como material de isolamento térmica

Dentre os inúmeros termofixos existentes encontram-se os poliuretanos (PU) na forma de espuma rígida, semi-rígida ou flexível. Os poliuretanos foram desenvolvidos por Otto Bayer em 1937 sendo produzidos pela reação de poliadição de um isocianato com poliálcool e em presença de agentes de cura e expansão, catalisadores, surfactantes e cargas (VILAR, 1998). As ligações cruzadas dos poliuretanos se formam pela reação dos grupos isocianatos residuais com grupamentos de uréia ou uretano Figura 3.2.

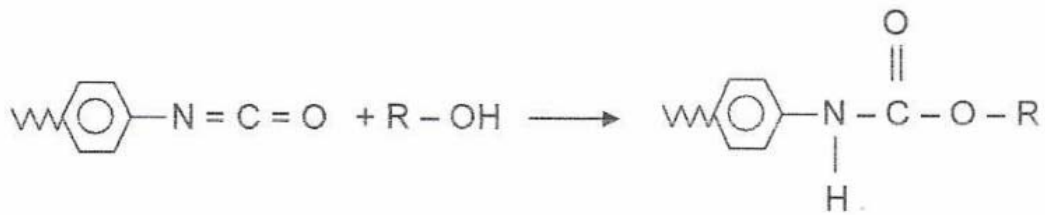


Figura 3.2. Representação da reação de obtenção do grupo uretano (BOLSONI, 2009).

Dependendo da composição e das características dos polióis, isocianatos e aditivos utilizados na síntese, podem ser obtidos poliuretanos com diferentes propriedades. As espumas PUR apresentam estrutura polimérica reticulada com células fechadas apresentando densidades variando de 10 kg/m<sup>3</sup> até 1000 kg/m<sup>3</sup>.

As densidades de espuma mais utilizadas são as que apresentam melhores características de isolamento térmico, que ocorre de 28 kg/m<sup>3</sup> a 50 kg/m<sup>3</sup>. A característica de isolamento desta faixa de densidade se dá devido às propriedades de baixa condutividade térmica dos gases que estão contidos na estrutura celular da espuma (VILAR, 1998).

A larga aplicação das espumas de poliuretano rígido (PUR) utilizadas nos diversos segmentos industriais, comerciais e doméstico é devida as suas propriedades térmicas, resistência mecânica e leveza (SAINT-MICHEL, 2006). Muitas formulações têm sido desenvolvidas para atender diversos segmentos do mercado. Na área de espumas flexíveis, os poliuretanos se popularizaram nas indústrias de colchões; os rígidos como isolante térmico em geladeiras, freezers e caminhões frigoríficos, na construção civil, em painéis divisórios, etc. (BECKER, 2001). Atualmente, os poliuretanos ocupam a sexta posição no mercado dos plásticos mais vendidos no mundo, com cerca de 5%, comprovando ser um dos produtos mais versáteis empregados pela indústria.

O mercado latino americano, com um consumo anual estimado em 500.000 toneladas, representa de 5 a 6% do mercado mundial, apresentando taxa de crescimento de 5% ao ano. Atualmente, o mercado brasileiro para o PU consome cerca de 280.000 toneladas anuais, correspondendo a aproximadamente 55% do total latino americano e a 68% do MERCOSUL (BECKER, 2001). As espumas flexíveis abrangem a maior parte do mercado brasileiro de PU (colchões, estofados e

automotivos), com cerca de 71%, conforme ilustrado no esquema da Figura 3.3. No entanto, as espumas rígidas, com um montante de 13% do mercado, ocupam o segundo lugar no consumo de PU no Brasil. É importante destacar que a maior parte da utilização das espumas rígidas (58% do volume) está voltada para o segmento da refrigeração doméstica e o restante para o mercado de transporte (17%), construção civil (16%), predominantemente painéis/telhas tipo sanduíche e isolamento térmica (*spray*, injeção e bloco) e outros (9%), (VILLAR, 1998).

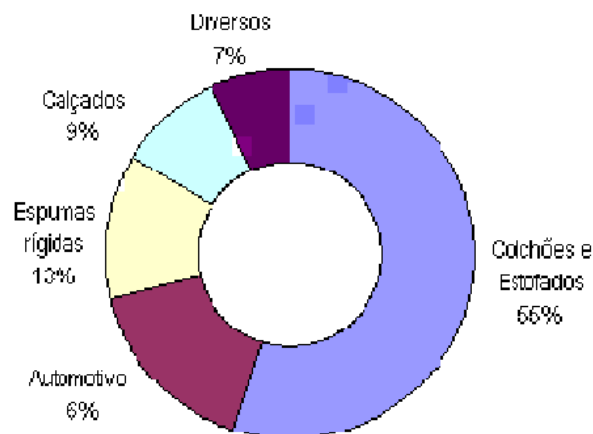


Figura 3.3. Consumo de PU por segmento no Brasil (VILLAR, 1998).

No Brasil na década de 70 os custos de matéria prima eram mais acessíveis e ocorreu um aumento de fábricas norteadas a tecnologias de processo descontínuo que propiciaram um investimento menor em equipamentos. Na década de 80 surgiu um processo de moldagem por injeção e reação RIM, do inglês, reaction injection molding (SEO, 2005).

Segundo McBryer e Wysocki (1998) as propriedades das PUR podem variar conforme as necessidades de uso com variações nos parâmetros do processo e/ou matérias-primas podendo formar espumas de células abertas, chamadas de espumas flexíveis, ou espumas de células fechadas, chamadas de espumas rígidas.

### 3.5.1 Propriedades das espumas rígidas quanto à isolamento térmica

O principal uso da espuma de poliuretano é em refrigeradores domésticos, e todas as empresas especializadas em refrigeradores estão usando, atualmente, o

poliuretano rígido espumado como isolamento em sua linha de montagem. Por causa das características isolantes superiores de gases de refrigeração à base de flúor carbono usados como agente de expansão nas espumas, os fabricantes podem construir refrigeradores com isolamento térmico mais fino e com a mesma condutividade de isolação que em materiais mais espessos. Essas propriedades também são usadas em isolamento de tanques e baús de caminhões refrigerados que carregam leite, sorvete e carnes. Além de possuírem propriedades particularmente boas, espumas rígidas contribuem à força estrutural do corpo do caminhão, têm baixa absorção de umidade, baixo peso específico e podem resistir a solventes, como a gasolina a temperaturas de até 100°C. O maior mercado está na construção civil para isolamento de paredes e telhas metálicas (ALMEIDA, 2002).

No caso da fabricação de isotérmicos, como caixas térmicas para armazenamento de bebidas e alimentos como cantis e garrafas térmicas para transporte de líquidos gelados ou quentes, a espuma é injetada diretamente sobre uma camada de polipropileno.

O caráter termorrígido é evidenciado pelo fato de que as espumas rígidas não são fusíveis, têm alto ponto de amolecimento e boa resistência a produtos químicos. O material pode ser usado em faixas de temperatura de -200°C a +150°C. O contato, por curto período de tempo, com materiais que estejam numa temperatura de 250°C, como a cobertura com betumem quente, não danifica a espuma. Apesar de seu caráter termorrígido, as espumas rígidas de PU são mais dúcteis que quebradiças. As propriedades dependem da densidade da espuma. A tensão de ruptura e o módulo de elasticidade aumentam com o aumento da densidade e somente o alongamento na ruptura decresce (VILAR, 1998). A Tabela 3.3 mostra os valores de resistência mecânica para espuma rígida de poliuretano para densidade de 32 kg/m<sup>3</sup>.

Tabela 3.3. Resistência mecânica de espuma de poliuretano de 32 kg/m<sup>3</sup> (VILAR, 1998)

PROPRIEDADES	VALORES TÍPICOS	
	Máximo	a 10% de deformação
Resistência à compressão (kPa)		
Paralela à direção do crescimento da espuma	200	140 a 180
Perpendicular à direção do crescimento da espuma	120	130 a 180
Resistência à tração (kPa)		
Paralela à direção do crescimento	350	
Perpendicular à direção do crescimento	250	
Resistência ao cisalhamento (kPa)	160	
Módulo de flexibilidade (MPa)	3	

### 3.5.1.1 Tipo de gás de preenchimento

Como visto anteriormente, a condutividade nos gases é menor que nos líquidos e nos sólidos e dentro dos gases a variação de condutividade irá depender do tipo de gás, Figura 3.4. Uma típica espuma rígida de poliuretano com densidade de 32 kg/m<sup>3</sup> consiste em 3% de polímero e 97% de gás retido nas células fechadas da espuma. Na faixa de densidade das espumas de PU utilizadas em isolamento térmico (30 a 60 kg/m<sup>3</sup>) a transmissão de calor da fase sólida polimérica é de cerca de 30%. A condutividade térmica, nas células fechadas das espumas rígidas de PU, devido a convecção ser pequena e portanto pode ser desprezada, e a condutividade térmica por radiação, só necessita ser levada em consideração em densidades inferiores a 30kg/m<sup>3</sup>, Figura 3.7.

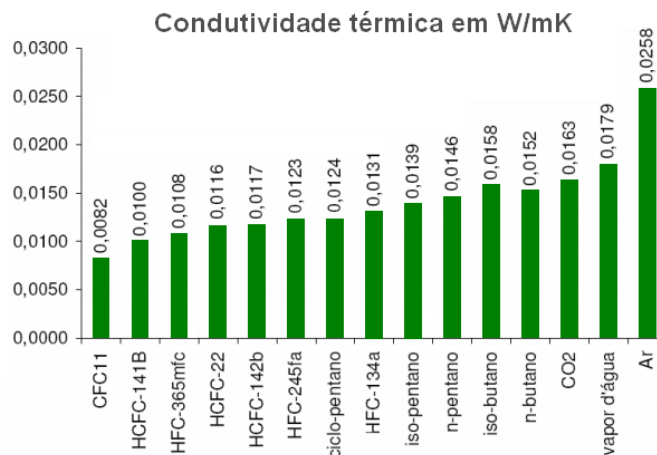


Figura 3.4. Condutividade térmica de diferentes agentes de expansão na fase gasosa (adaptado VILAR, 1998)

### 3.5.1.2 Estrutura celular, tamanho e quantidade de células

As trocas térmicas por radiação diminuem com o aumento do número de células por unidade de volume nas densidades maiores e a condutividade pelo gás também diminui. Aumentando-se o número de células, a radiação possuirá maiores barreiras para passagem do calor, caso 'A' da Figura 3.5. No entanto, a condutividade pelo polímero irá aumentar, pois aumentará a quantidade das paredes das células com o aumento da densidade.

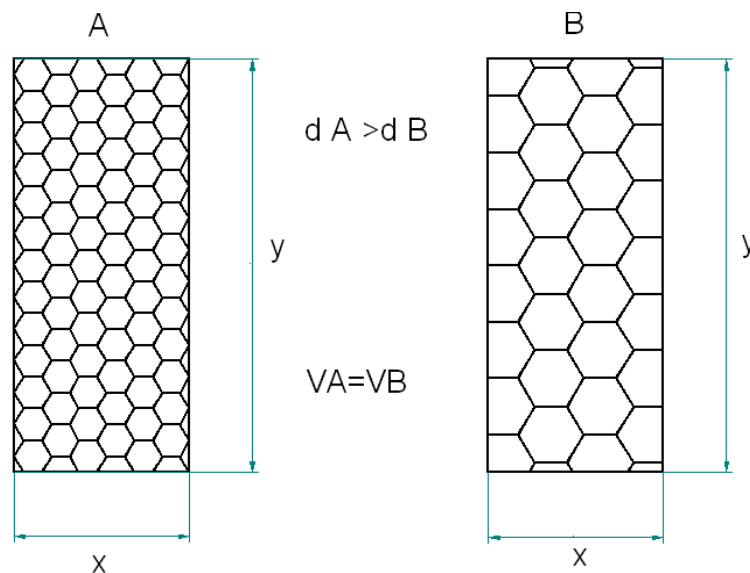


Figura 3.5. Relação quantidade de células x densidade para mesmo volume

Em espumas com densidades menores pode ocorrer escape do gás isolante, nesse caso, as células são constituídas de material muito fino favorecendo o escape do gás para o ambiente, pois as paredes das células não oferecerão resistência suficiente à permeabilidade do gás.

### 3.5.1.3 Massa específica

Além da condutividade nos isolantes mudar, pelos motivos já vistos, ela também varia em função da densidade. Em geral, a condutividade diminui com o aumento da densidade e ao passar pela densidade de menor condutividade volta a



aumentar. Na espuma rígida de poliuretano não é diferente, na faixa de densidade de  $35 \text{ kg/m}^3$  a  $45 \text{ kg/m}^3$  a condutividade é mínima, Figura 3.6.

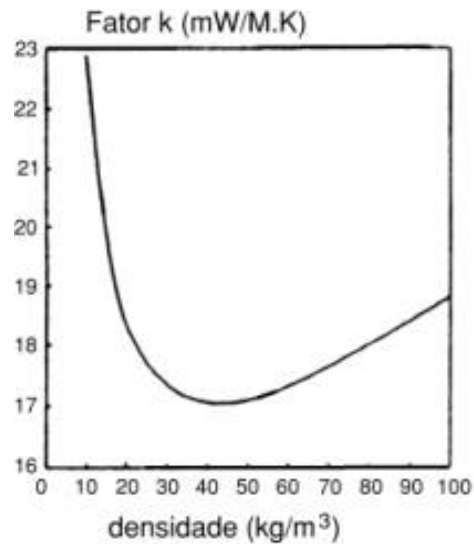


Figura 3.6. Variação da densidade com condutividade térmica da espuma rígida de poliuretano (VILAR, 1998)

A condutividade térmica no final da espuma é determinada em função das contribuições devido à radiação, condutividade térmica do gás e do polímero, sendo representadas pela Figura 3.7, com as devidas contribuições percentuais de cada tipo de troca de calor, numa espuma de densidade de  $40 \text{ kg/m}^3$ .

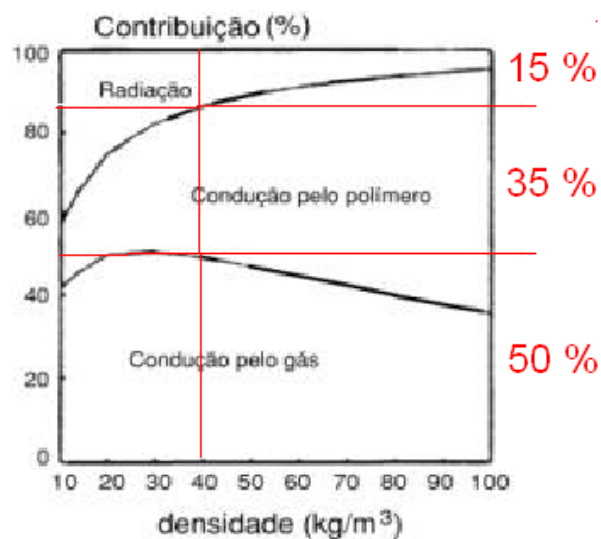


Figura 3.7. Percentual de participação do processo de troca térmica com densidade (adaptado VILAR, 1998)

Pode-se observar que na densidade de menor condutividade a contribuição responsável pela troca de calor devido à condução pelo gás é de 50%, condução pelo polímero 35% e radiação 15%. Observa-se que a contribuição da radiação é maior em baixas densidades, onde o número de células é menor e de dimensões maiores, como visto no item anterior.

A condutividade térmica nas células fechadas das espumas rígidas de PU, devido à convecção é pequena e deve ser desprezada, enquanto a condutividade térmica por radiação só deve ser levada em consideração em densidades menores que  $30 \text{ kg/m}^3$ . Observando que as trocas de calor na superfície do material devem ser analisadas por outra ótica e considerações pela ação que se produzem na superfície.

#### 3.5.1.4 Anisotropia

A estrutura celular, formada pelo esqueleto e paredes que suportam a construção da espuma, tem grande influência nas propriedades. Segundo Akuto e Sato (1988), Modal (2004) e Thirumal (2007) o fator de condutividade da espuma rígida depende, entre as já discutidas, do tamanho das células e especialmente do formato e orientação, e que segundo Kempner (2004) é fortemente influenciado pelo processamento.

As células esféricas exibem as mesmas propriedades em todas as direções e a espuma é isotrópica. Contudo, as células podem ser alongadas (elípticas) na direção do crescimento, e a espuma então apresentará propriedades diferentes, nos dois sentidos principais, e será anisotrópica, Figura 3.8.



Figura 3.8. Anisotropia da espuma do poliuretano (VILAR,1998)

Em (A) tem-se células esféricas e propriedades iguais em todas as direções. Em (B) tem-se células elípticas e propriedades dependentes da direção (anisotropia).

As perdas por radiação num plástico celular não dependem somente da temperatura, mas também da fração do gás, forma, tamanho, orientação das células e do filme de polímero (TORREIRA,1980). Dentro de uma mesma densidade, considerando uma mesma espessura o sentido de alongamento da célula pode influenciar no isolamento térmico. Pode-se observar na Figura 3.9, que no sentido da seta esquerda para direita existem 6 células e no sentido da seta de baixo para cima existem apenas três células. O que indica uma condutividade térmica menor no sentido da esquerda para direita devido ao maior número de células e para efeitos de radiação. Outro fator a considerar é a resistência mecânica tanto de compressão quanto de tração, que é consideravelmente superior no sentido vertical.

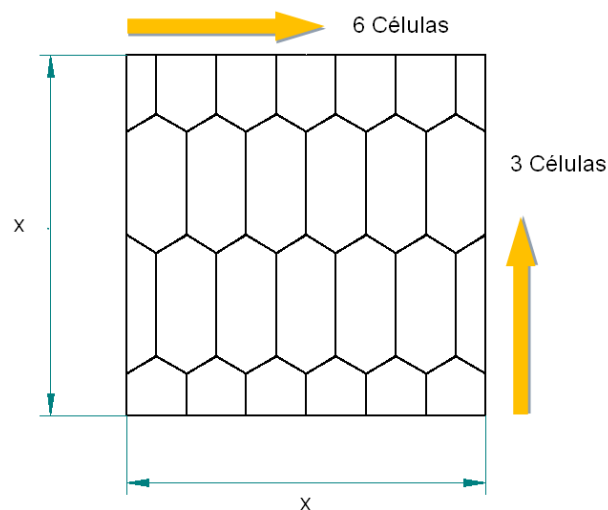


Figura 3.9. Anisotropia da espuma de poliuretano x isolamento e número de células

### 3.6 Usinabilidade do poliuretano

A usinagem abrange uma gama de processos de fabricação utilizados para dar forma a um componente através da remoção de material. O material removido é chamado de cavaco (FERRARESI, 1995). Quando o processo é automatizado, controlado por um computador, fala-se em usinagem CNC (comando numérico computadorizado). A Figura 3.10 mostra uma fresadora com comando numérico

computadorizado onde a espuma flexível é fixada à mesa por meio de moldura e por um sistema de vácuo conectado através de um furo no centro da plataforma.

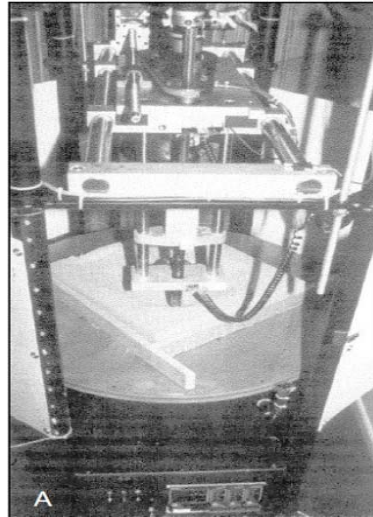


Figura 3.10 Equipamento para usinagem de poliuretano flexível (BRIENZA et al., 1992).

No caso da usinagem da espuma flexível de poliuretano o maior problema encontrado segundo Brienza et al. (1992), é o desprendimento da espuma da mesa rotatória, fazendo com que a espuma se prenda na ferramenta de corte e seja destruída. No caso da usinagem de espumas flexíveis existe um processo desenvolvido por Olari e Allen (2004) onde a espuma flexível é temporariamente transformada em rígida, sendo esta molhada e resfriada por um gás antes do corte. Outros métodos utilizados para enrijecer a espuma foram gases liquefeitos, tais como nitrogênio líquido e dióxido de carbono. O enrijecimento da espuma flexível dificulta o desprendimento da mesa e facilita a usinagem, pois a usinagem convencional com CNC em espumas flexíveis arranca material durante a usinagem, segundo Olari e Allen (2004) e o processo de enrijecimento é um processo caro.

Devem-se determinar os parâmetros de corte corretos para cada material como:

- a) Profundidade de corte;
- b) Velocidade de Avanço;
- c) Tipo de ferramenta;
- d) Velocidade de corte tangencial;
- e) Rotação;

- f) Penetração de trabalho;
- g) Sentido de corte concordante ou discordante.

As dificuldades em usinar espumas de baixas densidades foram encontradas por Silva et al. (2011) onde foram arrancadas partes do material para uma espuma de densidade de D20 em velocidades mais baixas. Com os testes realizados pelos autores foi construído um mapa de seleção de parâmetros de usinagem para cada densidade de espuma flexível, Figura 3.11.

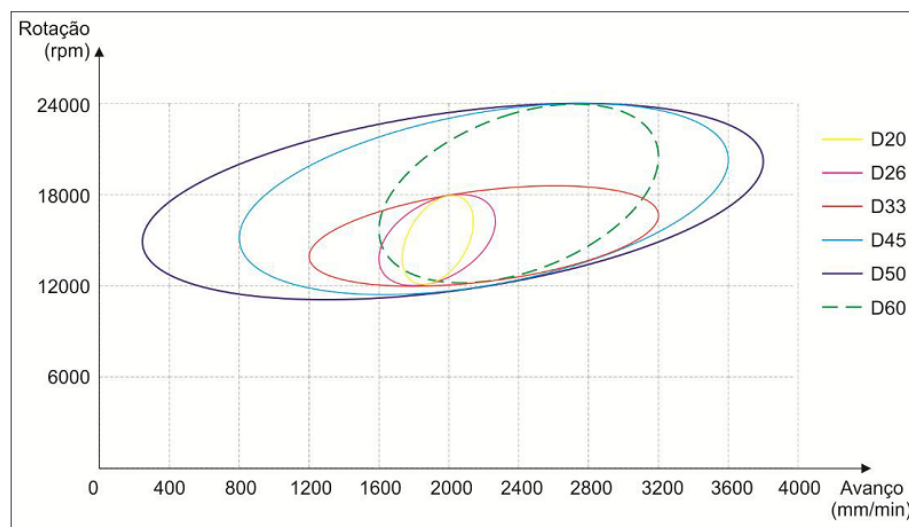


Figura 3.11. Mapa de seleção de rotações e avanços para espumas flexíveis (SILVA et al., 2011)

Em densidades maiores podem-se ter altas velocidades de corte e de avanço o que pode reduzir tempos de usinagem e consequentemente custos com a mesma. Devido a poucos estudos de parâmetros de usinabilidade de espuma rígida de poliuretano, o mapa da Figura 3.11 fornece parâmetros para embasamento dos parâmetros de corte para espuma rígida. Em espumas rígidas de poliuretano a usinagem ficaria facilitada por esse tipo de espuma apresentar maior rigidez.

Jaramillo (2011), no desenvolvimento de um manipulador de usinagem, utilizou a espuma rígida de poliuretano de  $15 \text{ kg/m}^3$  e obteve melhores resultados de usinagem com uma usinagem concordante. Na Figura 3.12, observam-se que para as três velocidades I -  $6 \text{ m/min}$ , II -  $4,8 \text{ m/min}$  e III -  $3,6 \text{ m/min}$  cada linha usinada dos algarismos romanos na parte superior foi utilizada usinagem concordante e na parte

debaixo com usinagem discordante, foram obtidos melhores resultados para rotação de 18.000 rpm,  $f = 2 \text{ mm}$ ,  $l = 6 \text{ mm}$  e usinagem concordante.

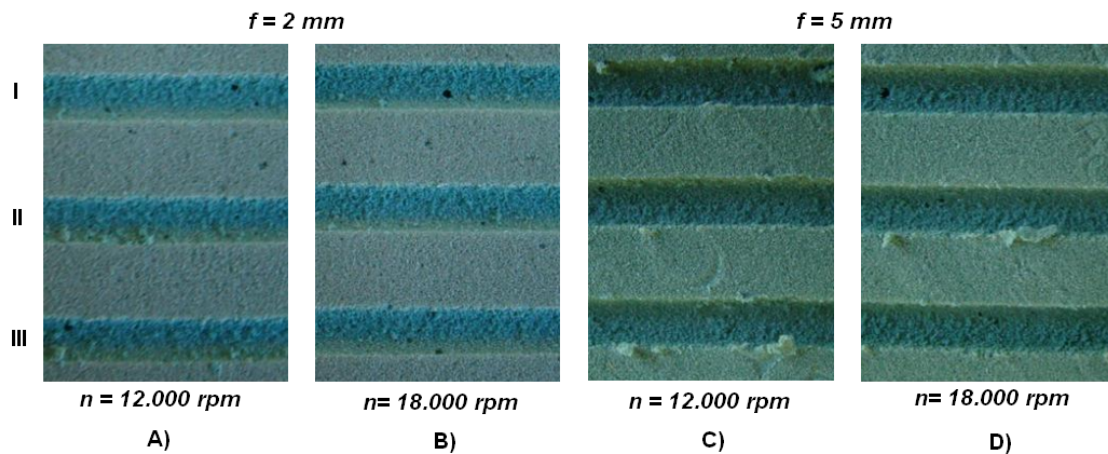


Figura 3.12. Qualidade de usinagem em diferentes rotações conforme ferramenta e sentido de usinagem (JARAMILO,2011)

### 3.7 Caracterização da espuma rígida quanto à isolamento térmica

No Brasil as normas técnicas devem passar por constantes revisões e adequar-se a padrões tecnológicos atuais, pois nossas normas deixam a desejar em muitos quesitos. Para caracterização da espuma rígida de poliuretano não é diferente. Serão apresentadas e discutidas as principais normas envolvidas no processo de caracterização da espuma rígida do poliuretano quanto à isolamento térmica. Esse assunto está associado diretamente à norma NBR 12094, teste de condutividade térmica e indiretamente as normas:

- a) NBR 6578 Determinação de absorção de água;
- b) NBR 11506 Determinação da massa específica aparente;
- c) NBR 11620 Determinação do conteúdo de células fechadas;
- d) NBR 8081 Permeabilidade de vapor de água.

Uma caracterização mais completa da espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico não deve levar somente em consideração a norma NBR 12094, pois as variações da condutividade térmica da espuma rígida de poliuretano também estão relacionadas às propriedades vistas no item 3.5.1. Essas normas auxiliares servem para determinar parâmetros de fabricação, aplicação, manuseio e

armazenamento, que darão melhores condições à espuma para fins de isolamento térmico.

Não é comum existir alguma norma para determinar a anisotropia da espuma rígida. Para essa propriedade pode-se realizar um estudo com o uso de micrografia ou de um modo bem prático utilizando-se de ensaios de compressão, pois como visto no item 3.5.1, no sentido de crescimento da espuma existe a possibilidade das células serem alongadas no sentido do eixo z e nesse sentido apresentará maior esforço ao ensaio de compressão, pois oferecerá maior resistência devido à disposição vertical mais alongada das células da espuma nesse sentido.

### **3.7.1 Teste de condutividade térmica**

A condutividade térmica dos materiais é de grande importância para o dimensionamento de projetos de isolamento de frigoríficos, painéis sanduíches, isolamento de fachadas, telhados, pisos isotérmicos. Os métodos para avaliar a condutividade térmica são divididos em métodos transientes e permanentes. Há uma maior existência de métodos permanentes que levam grande quantidade de tempo para alcançar o estado estacionário e onde é avaliada a propriedade de condutividade térmica.

Nos métodos permanentes define-se que a temperatura não varia com o tempo sendo na prática considerado por variações numa faixa de 1°C e a condutividade térmica é medida apenas em estado estacionário da transferência de calor. Esse método está fundamentado na transferência unidimensional em regime permanente do calor, onde o fluxo de calor depende da diferença de temperatura e da resistência térmica do material.

Existem fluxímetros para medição do fluxo de calor e que segundo Simioni (2005) podem estar dispostos de três formas de montagem:

- a) Uma amostra e um fluxímetro;
- b) Uma amostra e dois fluxímetros;
- c) Um fluxímetro e duas amostras.

Em todas as montagens utilizam-se uma placa quente e uma placa fria, Figura 3.13.

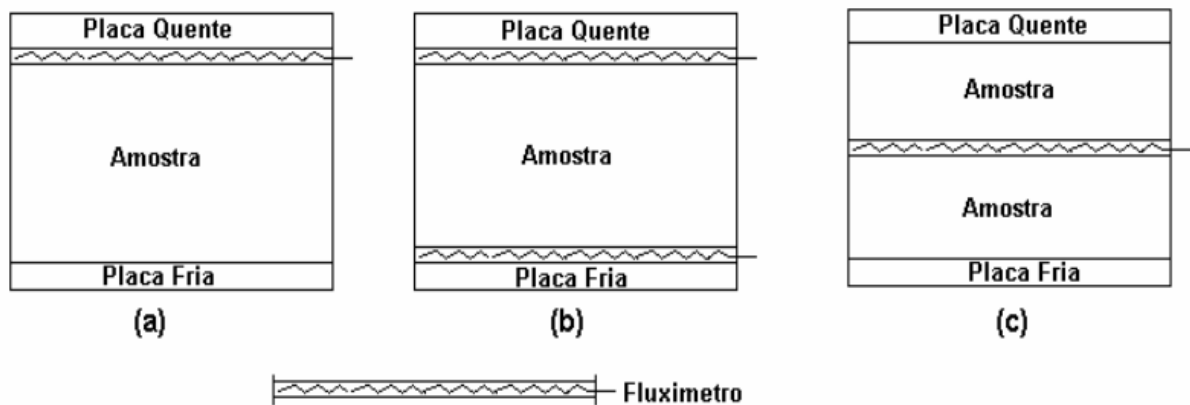


Figura 3.13. Possíveis arranjos para o método fluximétrico (SIMIONI, 2005)

A amostra é submetida a uma taxa de transferência de calor, gerado por uma resistência aquecedora alimentada por uma fonte de tensão regulável. Considerando-se que a resistência dissipa calor na placa quente tendo a função de distribuir uniformemente o calor em toda a sua área transformando-a numa superfície isotérmica. Todo o calor gerado então pela resistência aquecedora atravessa o primeiro transdutor, na sequência a amostra, e depois o segundo transdutor é retirado pela placa fria, por onde pode circular um fluido de temperatura conhecida mais baixa.

O fluxo de calor que passa através do fluxímetro é o mesmo que passa através da amostra, considerando que não ocorram fugas laterais. Desta forma, o fluxo de calor é obtido diretamente com os fluxímetros. Conhecendo-se a área da amostra, espessura, fluxo de calor que passa através da amostra e medindo-se as temperaturas das faces da mesma, obtém-se através da Lei de Fourier, Equação 3.1, a condutividade térmica, nesse método os fluxímetros devem ser calibrados periodicamente.

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (3.1)$$

Onde:

$\dot{Q}$  - Taxa de calor transferido por condução (W);

k- Condutividade térmica do material (W/m.K);

$T_1$ - Temperatura de superfície 1 (K);

$T_2$ - Temperatura de superfície 2 (K);



A - Área da superfície transversal de incidência de calor ( $m^2$ );

L - Distância entre as superfícies 1 e 2 (m).

O teste de condutividade térmica segundo a norma NBR 12094 enquadra-se na configuração 'a' da Figura 3.14 e de acordo com o método é estabelecido contato térmico mediante disposição da placa quente e outra fria.

Utiliza-se uma aparelhagem constituída de duas placas isotérmicas, um ou mais transdutores de fluxo de calor, dispositivos para medição, controle de temperatura e medição de espessura.

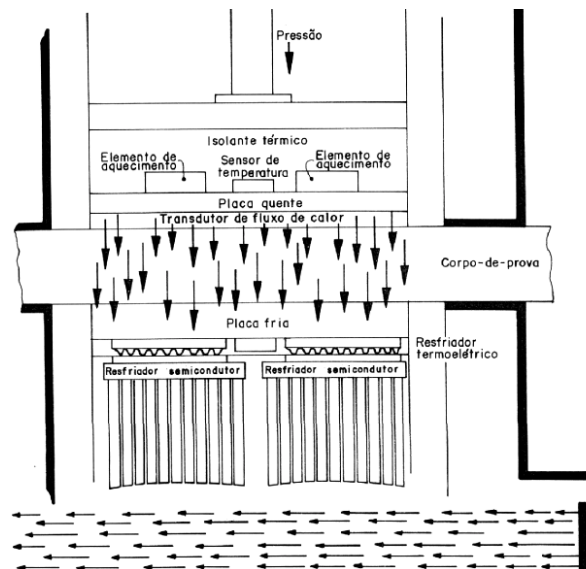


Figura 3.14. Sistema de placa quente protegida determinação da condutividade térmica do poliuretano norma NBR 12094

O material a ser ensaiado deve ser colocado entre duas placas isotérmicas, conhecidas como placa quente e placa fria, que podem ser aquecidas e resfriadas, por meio de aquecedores elétricos e pela circulação de líquidos refrigerados. É importante que tanto as placas do material de teste quanto às placas fria e quente sejam perfeitamente planas e paralelas. São instalados sensores nas ranhuras feitas na superfície das placas e assume-se que as superfícies das placas do equipamento sejam isotérmicas paralelas entre si e que o calor seja transferido na direção perpendicular a essas superfícies, analisando-se a condutividade térmica e a diferença das temperaturas calcula-se o fluxo de calor.

Para minimizar as perdas de calor para o ambiente, deve se colocar um isolante térmico em torno do corpo de prova e das placas quente e fria. Na execução do ensaio deve-se estabelecer o regime permanente para calcular a condutividade. A placa aquecida deve estar ajustada a temperatura de  $(38, \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$  e da placa fria em  $(10 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$  gerando um delta de temperatura de  $\pm 18^{\circ}\text{C}$ . Os corpos-de-prova, antes do ensaio, devem ser condicionados durante 24 h, à temperatura de  $(23 \pm 1)^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $(55 \pm 5)\%$ . Essa norma não estabelece um padrão de esforço da pressão necessária a ser feita no momento de colocação do corpo de prova no dispositivo da Figura 3.16. Todas as medidas de pressão exercida para teste de condutividade deveriam ser padronizadas com o mesmo esforço em todos corpos de prova para evitar possíveis erros. Assim, para cada tipo de material ensaiado deveria ser estipulado um padrão de esforço.

Outro método para determinar a condutividade térmica para materiais sólidos e granulares é referenciado pela norma NBR 15220-4, chamado método da placa quente protegida, Figura 3.15.

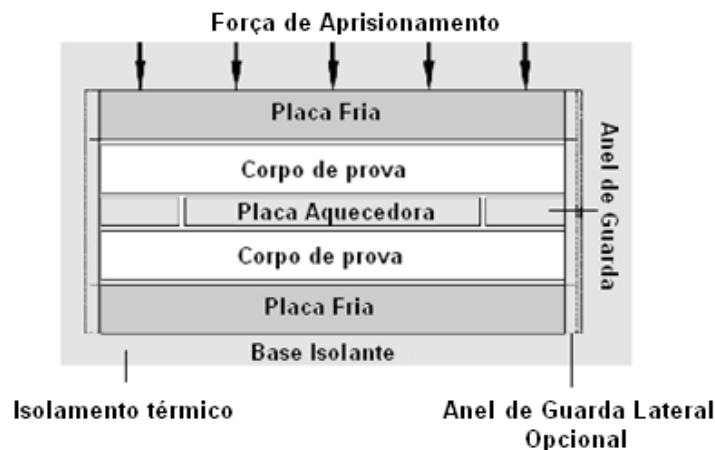


Figura 3.15. Configuração de ensaio placa quente protegida segundo norma NBR 15220-4

Medindo-se as temperaturas das faces das amostras e aplicando a Lei de Fourier Equação 3.1 pode-se calcular a condutividade térmica das amostras. Uma placa central (placa quente ou núcleo) é aquecida, dissipando calor por intermédio de uma resistência aquecedora, alimentada por uma fonte de “tensão-corrente”. A potência dissipada na resistência aquecedora deve ser conhecida. A placa quente tem a função de distribuir uniformemente o calor em toda a área, formando uma

superfície isotérmica. O equipamento possui um anel de proteção lateral com objetivo de minimizar as perdas de calor laterais (SIMIONI, 2005).

Utilizam-se frequentemente termopares de pequeno diâmetro, montados de forma individual ou como termopilha. O núcleo e o anel possuem aquecedores independentes. Através do controle da voltagem de alimentação em cada resistência, determina-se o calor gerado em cada parte. As temperaturas da superfície da amostra nas regiões de contato com o anel e com o núcleo devem ser iguais. A igualdade de temperatura assim estabelecida, evita a perda de calor lateral pelo núcleo e garante um fluxo de calor unidimensional nessa região (RIBEIRO, 2003).

São confeccionadas para o teste duas amostras idênticas sendo que as espessuras mínimas dos corpos de prova, segundo a norma NBR 15220-4, deve ser 25 mm. Segundo Troussart (1985) o erro do teste aumenta à medida que se aumenta a espessura do material ensaiado.

A norma diz que a diferença de temperatura deve ser entre 15°C e 20°C entre os corpos de prova. Para verificação da condutividade térmica deve-se alcançar o regime permanente. Segundo Moura (1993) o tempo para alcançar regime permanente é de aproximadamente 25 a 30 horas. Essa norma, igualmente à norma NBR 12094 para espuma rígida, não estabelece o esforço necessário, a intensidade de aperto pelo equipamento, mas estabelece que para corpos que podem se deformar, ou seja, corpos compressíveis são usados materiais espaçadores entre as placas. Segundo Moura (1993) esse método é considerado primário para aferição da condutividade. O Quadro 3.2 mostra um resumo dos métodos para avaliação de condutividade térmica e seu enquadramento para avaliar a condutividade térmica do poliuretano, tipo de geometria da amostra e tipo de material que pode ser testado.

Quadro 3.2. Condutividade térmica e tipos de regime de teste (adaptado de SANTOS, 2004; SANTOS, 2005; SIMIONI, 2005; TROUSSART, 1985; MOURA, 1993).

Regime	Método	Formato Amostra	Materiais de teste	Indica-se ou adapta-se a espuma rígida de poliuretano
Permanente	Placa quente protegida	Retangular e planas	Materiais isolantes em geral e de construção, com condutividade térmica baixa	Sim
	Fluximétrico	Retangular e planas	Materiais isolantes, materiais de construção	Sim
	Calorímetro a água	Retangular e planas	Metais. Materiais de construção e isolantes	Não
	Tubo quente	Cilíndricas e vazadas	Isolantes para tubulações	Sim
Transiente	Fio Quente	Retangular e planas ou semicilindros	Materiais cerâmicos, materiais poliméricos	Sim
	Pulso de energia (Flasch)	Circular e plana	Metais cerâmicas, compósitos, líquidos e materiais poliméricos e transparentes	Não
	Disco quente	Chapas finas planas retangulares ou circulares	Plásticos sólidos e vidros	Não

Em regime transiente, as medidas de temperatura são efetuadas em função do tempo, identificando-se além da condutividade térmica, a difusividade térmica do material (SOUSA, 2012).

### 3.7.2 Determinação da umidade

A condutividade térmica tem forte influência em condições em que o material encontra-se úmido como comentado anteriormente no item 3.4. A umidade está relacionada também com o tamanho das células do material e principalmente se elas estão abertas ou fechadas. A norma NBR 6578 avalia o percentual de absorção de água na espuma rígida de poliuretano. O teste consiste em mergulhar os corpos de prova na água de um recipiente de altura  $(50 \pm 1)$  mm com auxílio de um suporte de fixação durante  $(15 \pm 1)$  min. Em seguida retiram-se os corpos de prova e coloca-se

disposto em uma tela ao ar livre durante  $(15 \pm 1)$  min para drenagem da água da superfície, Figura 3.16.

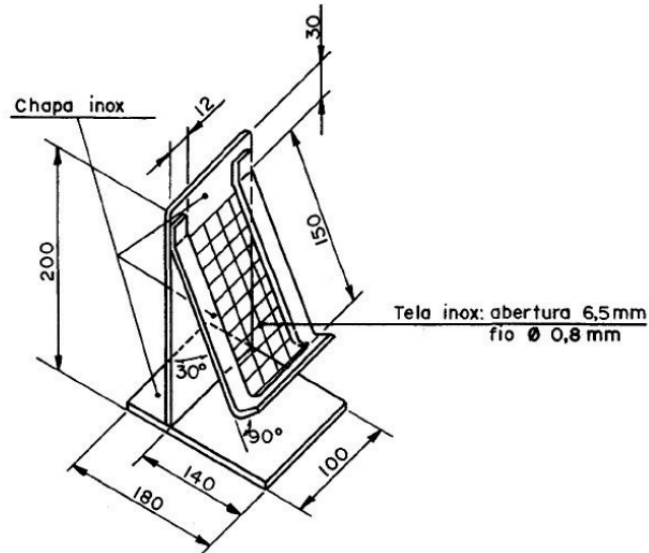


Figura 3.16. Aparato de secagem de amostras de poliuretano NBR 6578

Em seguida pesam-se os corpos de prova que são considerados como massa inicial. Passado os  $(15 \pm 1)$  min coloca-se novamente no recipiente com água por um período de 24hs, executa-se novo procedimento para retirada de água da superfície e pesa-se novamente e são agora considerados como massa final. Tendo-se as dimensões inicialmente aferidas de largura, comprimento e altura antes de entrar pela primeira vez no recipiente com água, procede-se ao cálculo do percentual de absorção de água de acordo com a Equação 3.2:

$$a = \frac{M_f - M_i}{A} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Onde:

a - Porcentagem de absorção de água por área;

M<sub>f</sub> - Massa final (g);

M<sub>i</sub> - Massa inicial (g);

A- Área total (cm<sup>2</sup>).

### 3.7.3 Massa específica

A influência da densidade em um corpo de prova de espuma rígida de poliuretano afeta diretamente a condutividade térmica com já foi visto. A norma NBR 11506 trata dos procedimentos adotados para a medição do teste de densidade. O corpo deve ter formato que permita calcular o volume com facilidade desde que não seja inferior a 25 cm<sup>3</sup>. As amostras devem permanecer no mínimo durante 40 horas a temperatura de (23 ± 2) °C e umidade relativa de (50 ± 5) %. Quando não for possível realizar o ensaio no mesmo ambiente de condicionamento deve-se proceder a execução do ensaio imediatamente após a retirada do corpo de prova das condições ambientais recomendadas anteriormente. Os corpos de prova devem ser pesados e medidos nas três dimensões. Calcula-se então a massa específica aparente pela Equação 3.3.

$$D_{cp} = \frac{M}{V} \quad (3.3)$$

Onde:

M - Massa do corpo de prova (kg);

V - Volume do corpo de prova (m<sup>3</sup>);

D<sub>cp</sub> - Massa específica aparente do corpo de prova (kg/m<sup>3</sup>).

Após calcula-se o desvio padrão utilizando-se de dois algarismos significativos, Equação 3.4.

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2 / N - 1} \quad (3.4)$$

Onde:

D<sub>i</sub> - Massa específica do corpo de prova (kg/m<sup>3</sup>);

$\bar{D}$  - Média aritmética das massas específicas dos “n” corpos de prova (kg/m<sup>3</sup>);

N - Número de corpos de prova medidos;

S - Desvio padrão estimado.

No método de placa quente protegida, a placa é comprimida no dispositivo de ensaio como visto na Figura 3.16, sendo assim seria mais sensato aferir a densidade antes do ensaio, pois devido a compressão o volume poderia diminuir na dimensão da espessura.

### 3.7.4 Determinação do conteúdo de células fechadas

Devido ao corte, as espumas rígidas de poliuretano sofrem processo de rompimento, isso acontece mais na região superficial. As células abertas absorvem mais água, pois existe maior permeabilidade ao vapor d'água, o percentual de células abertas é em torno de 5%. A norma NBR 11620 determina o conteúdo de células fechadas em espuma rígida de poliuretano pelo processo de picnômetro de comparação com ar. No teste são utilizados dois cilindros e um medidor diferencial de pressão. Em um desses cilindros é colocado o corpo de prova, ao se exercer uma pressão no êmbolo de um dos cilindros esse desloca o ar. O corpo de prova depois de preparado é colocado dentro de um dos cilindros e no outro é exercido a pressão fazendo o êmbolo se deslocar gerando consequência no segundo cilindro que deverá se movimentar realizando a aferição da leitura, quanto mais esse cilindro movimentar-se maior é a quantidade de células abertas, Figura 3.17.

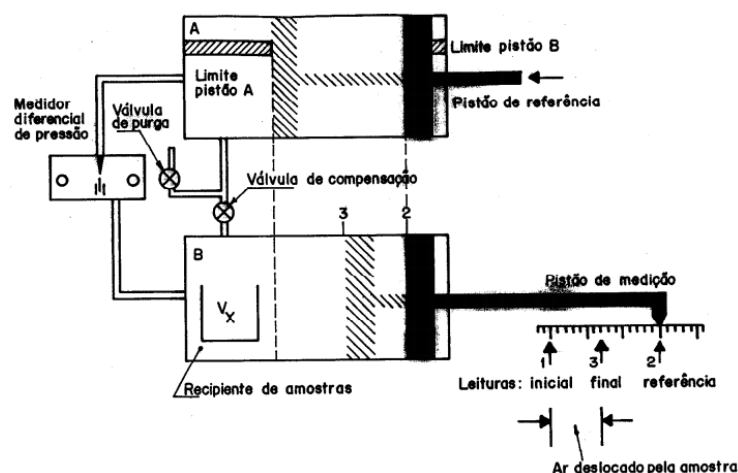


Figura 3.17. Aparato para determinação de células fechadas NBR 11620

### 3.8 Processos de fabricação das espumas de poliuretano

Os processos de fabricação possuem grande influência na qualidade da espuma, espumas com células mais homogêneas podem ser obtidas com equipamentos de mistura automática, o que não poderia ser obtido em métodos manuais. Homogeneidade e uniformidade das células indicam um melhor isolamento térmico e questões como o número, tamanho e formato das células deve ser levado em consideração em cada processo de aplicação da espuma. Analisar também os processos de fabricação, equipamentos, moldes usados e condições ambientais de espumação são de grande valia para se ter sucesso garantido em qualidade e produção.

Segundo Vilar (1998) as espumas rígidas apresentam boa fluidez durante a expansão e boa adesão a diferentes materiais, são a base de diversos processos de fabricação, nas quais a espuma torna-se parte de um produto final.

Os processos de fabricação podem ser classificados em métodos contínuos e descontínuos. O Quadro 3.3 mostra as características e aplicações de cada processo.

Quadro 3.3. Processos de fabricação, características e aplicações da espuma rígida (VILAR, 1998)

<b>Processo/ Características Aplicações</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Contínuo</b>	São mais econômicos, fabricação de grandes quantidades, espumas de melhor qualidade mais homogênea e uniformes e fácil controle do tamanho das células. Usa máquina de injeção e processo automatizado	Painéis para diversos tipos de aplicação usados em frigoríficos, containers, painéis decorativos e painéis para isolamento de telhados, pisos e paredes.
<b>Descontínuo</b>	Pesagem de mistura manual, maior desperdício de matéria prima, o sistema de mistura pode ser manual ou automatizado, pode-se utilizar um caixote como molde para os blocos formados	Refrigeradores, caixas térmica (coolers) painéis frigoríficos em pequenas escalas de formatos complexos e grandes, isolamento de dutos, oleodutos, aplicação com moldes.



Nos processos contínuos a espuma de poliuretano é aderida a materiais como papel revestido com polietileno, folhas de alumínio e tecido de fibra de vidro com betumem, aço inox e alumínio e no final da linha de produção as chapas são cortadas.

No processo descontínuo os materiais de revestimento são: aço inox, alumínio, polipropileno e madeira que são colocados após os blocos da espuma ficarem prontos, nessa etapa são usados adesivos a base de PU para aderir esses materiais, em alguns casos é necessário uma fonte de calor durante a cura. Outro modo é injetar a mistura na cavidade a ser preenchida, que após a cura é aderida à superfície da cavidade, esse método é usado na injeção de produtos isotérmicos como caixas térmicas e muitos tipos de garrafas.

No processo descontínuo é realizado espumação (inserção de espuma em cavidades) em cada produto individualmente e os processos de injeção podem ser sob pressão com aplicação do processo RIM ou a vácuo. O primeiro possui a capacidade de homogeneizar e uniformizar o material na aplicação melhorando a estrutura celular a ser formada, já o segundo é realizado no próprio molde ou produto. O processo tipo a vácuo garante um correto preenchimento do molde dando melhores características de uniformidade das células e melhorando assim também a densidade. Os painéis fabricados por um processo ou por outro podem ser perfilados fabricados em plástico, alumínio, aço, em diversos perfis geométricos e são aderidos à espuma, podendo ser aplicados a processos descontínuos para injeção de refrigeradores ou produtos isotérmicos. A Figura 3.18, mostra as aplicações.

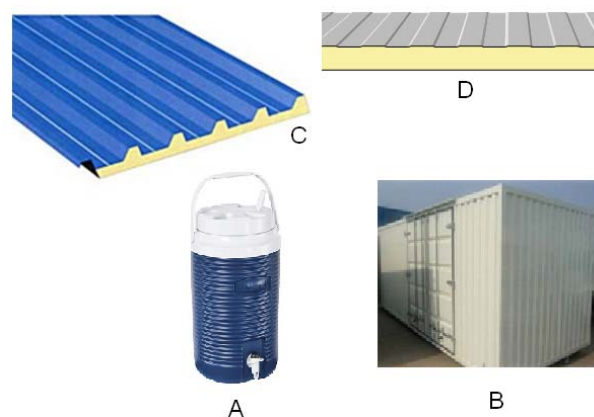


Figura 3.18. Aplicações de poliuretano com outros materiais (A) e (D) Perfilados para telhado e paredes (B) Perfilados para containers e (A) Superfície perfilada para isotérmico.

Fonte: <http://www.irmalex.com>

### 3.9 Processos de transferência de calor

Toda vez que houver diferença de temperatura entre dois pontos haverá transferência de calor do ponto de maior temperatura para o ponto de menor temperatura. A finalidade do estudo da transferência de calor está em encontrar os fluxos de calor e as temperaturas envolvidas nos processos e tornando-se importante quando se pretende minimizar ou aumentar processos de troca térmica ou controlar temperaturas. Serão discutidos a seguir os três modos de propagação do calor: condução, convecção e radiação.

#### 3.9.1 Condução

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato físico direto (KREITH; BOHN, 1977).

Na transferência de calor por condução ocorre troca de energia entre sistemas, ou partes de um mesmo sistema em diferentes temperaturas que ocorre pela interação molecular, na qual moléculas de alto nível energético transferem energia, pelo impacto às outras de menor nível energético, gerando uma onda térmica, cuja velocidade de propagação depende claramente da natureza da matéria (FILHO, 2004).

Segundo Dare e Neme (2005) a condução depende das trocas de energia molecular no meio condutor, ocorrendo devido ao aumento de energia cinética proporcionado por uma excitação térmica em uma região de um corpo. Elétrons com maior energia tornam-se mais velozes e com órbitas mais amplas, chocando-se com elétrons vizinhos. Esses recebem os choques, ganham mais energia interna, passando a suceder de forma semelhante ao primeiro.

A taxa de calor que flui através de um elemento opaco é função do material que o constitui, da espessura do elemento e do gradiente de temperatura. A grandeza física que caracteriza se um material é melhor ou pior condutor de calor chama-se condutividade térmica (RODRIGUES, 1988).

A transferência de calor ou fluxo de calor por condução, em uma dada direção, é proporcional à área normal à direção do fluxo e ao gradiente de

temperatura naquela direção (ÖZISIK, 1990). Para paredes planas a lei de Fourier pode ser expressa matematicamente pela Equação 3.1.

### 3.9.1.1 Variação da condutividade térmica

Em um material poroso como o poliuretano, a condutividade térmica pode variar em função de muitos fatores. A condutividade térmica é dependente da fase em que o material se encontra, do peso específico, da porosidade, umidade e sobre tudo da temperatura. Segundo Aktusu e Sato (1988) a condutividade térmica de materiais compostos está em função das propriedades radiantes das superfícies e da fração de ar aprisionado no interior do material.

A variação da condutividade térmica com a temperatura em alguns materiais, dentro de um certo intervalo é bastante pequena e pode ser desprezada, mas em muitos casos essa variação é significativa (DÂMASO, 2009).

A Figura 3.19 mostra as variações da condutividade térmica em alguns materiais em função da temperatura. Em alguns materiais ela aumenta em função da temperatura e em outros diminui.

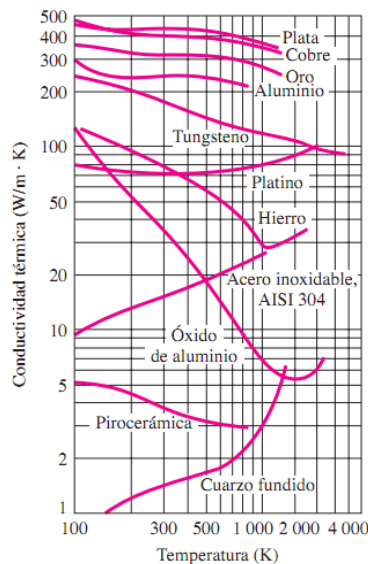


Figura 3.19. Condutividade térmica dos materiais x temperatura (CENGEL, 2012)

O desempenho de um isolante térmico é avaliado de acordo com a condutividade térmica medida em laboratório através de ensaios adequados, forma

mais usual para especificações em projetos. Os métodos vistos no item 3.7.1 para o caso do poliuretano são os mais utilizados.

### 3.9.1.2 Condução do calor unidimensional

Na prática a condução de calor se propaga em todas as direções, mas é considerada unidimensional para avaliações de muitos problemas de engenharia e também é considerada em regime permanente, essas suposições servem para a simplificação de cálculos, Figura 3.20. Os experimentos discutidos anteriormente para a análise de condutividade térmica e para a determinação do coeficiente de convecção que será visto mais adiante, usa essa consideração. Ela é feita quando a espessura é pequena, comparando com a área perpendicular ao fluxo, nessa situação desprezam-se as perdas laterais de calor e considera-se a propagação em um só sentido (INCROPERA, 2003).

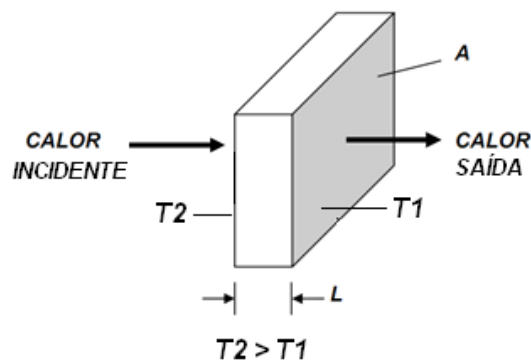


Figura 3.20. Condução de calor unidimensional em uma chapa fina (adaptado SANTOS, 2006)

### 3.9.2 Convecção

Como na condução, a convecção necessita de um meio físico para acontecer a transferência de calor. A primeira ocorre tanto em sólidos quanto em fluidos. Na convecção a transferência de calor ocorre somente nos fluidos e esses necessariamente deverão estar em movimento. Quando a troca de calor ocorre apenas pelas diferenças de pressão gerando movimento devido a uma variação de temperatura ela se chama de convecção natural. Quando a massa de fluido estão em movimento com variação de temperatura e são influenciadas por um agente que

faz com que essas massas de fluido acelerem ou desacelerem variando assim a velocidade sobre uma determinada superfície, se define como convecção forçada. Segundo a lei de resfriamento de Newton a convecção pode ser expressa pela Equação 3.5.

$$\dot{Q} = h \cdot A_s (T_s - T_\infty) \quad (3.5)$$

Onde:

$\dot{Q}$  - Taxa de transferência de calor (W);

$A_s$  - Área da superfície (m<sup>2</sup>);

$h$  - Coeficiente de convecção (W/m<sup>2</sup>.K);

$T_s$  - Temperatura da superfície de contato com calor (K);

$T_\infty$  - Temperatura do fluido suficientemente longe da superfície (K).

Apesar da simplicidade da expressão da eq (3.5), a determinação do coeficiente de convecção ( $h$ ) envolve um complexo estudo de propriedades físicas do fluido e do corpo em estudo, que podem ser mostradas no Quadro 3.4.

Quadro 3.4. Variáveis que interferem no coeficiente de convecção (adaptado CENGEL, 2012)

<b>Características do corpo</b>	<b>Propriedades do fluido</b>	<b>Movimento do fluido</b>
Tipo de geometria Material Dimensão do corpo	Viscosidade dinâmica Densidade Coeficiente de expansão volumétrica Calor específico Condutividade térmica	Velocidade do fluido Aceleração da gravidade Diferença de temperatura

A convecção pode ser ainda turbulenta ou laminar. A teoria dos escoamentos turbulentos ainda não foi completamente desenvolvida, portanto temos de confiar nos experimentos e nas correlações empíricas ou semi empíricas desenvolvidas para diferentes situações. A maioria das correlações de transferência de calor por convecção natural baseiam-se em medições experimentais, pois a complexidade do movimento do fluido torna muito difícil a obtenção de relações analíticas simples

para a transferência de calor por meio da resolução das equações que regem o movimento e a energia (CENGEL, 2012).

### 3.9.2.1 Camada limite cinética e camada limite térmica

A velocidade de escoamento ( $V$ ) das partículas do ar que estão em contato com a superfície passam a ter velocidade zero e elas influenciam as camadas adjacentes para retardar o movimento do fluido, até uma distância da superfície ( $y = \delta_c$ ) onde o efeito torna-se desprezível. A espessura da camada limite cinética é definida como o valor para o qual  $V=0,99 V_\infty$ . Assim, o escoamento é caracterizado por duas regiões diferentes, uma primeira onde a superfície influencia as condições de escoamento gerando gradientes maiores de velocidade e uma segunda camada externa em que os gradientes são desprezíveis devido à pequena influência da superfície. A espessura da camada limite cinética depende das condições de atrito local e da viscosidade dinâmica do fluido. Mas é importante destacar que conforme o fluido avança na superfície os efeitos de atrito penetram cada vez mais no escoamento e a camada limite aumenta, Figura 3.21.

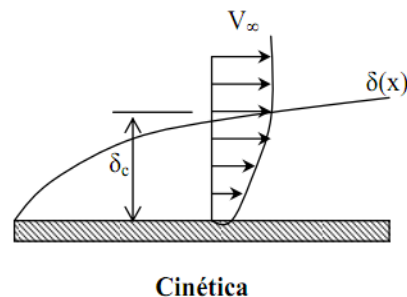


Figura 3.21. Camada limite cinética (ORDENES, 2008)

Um fluido em movimento atinge repouso completo na superfície e assume velocidade zero em relação à superfície. O fluido em contato com um sólido adere à superfície por causa dos efeitos viscosos e não há escorregamento, o que forma uma película estacionária sobre o sólido. Outra consequência da condição de não deslizamento e que ocorre é o arrasto da superfície que é a força exercida pelo fluido sobre a superfície na direção do escoamento. Isso implica que a transferência de calor, a partir da superfície sólida para a camada de fluido adjacente à superfície, ocorre por condução pura.

Sempre que existir uma diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, existirá uma camada limite térmica, Figura 3.22, que indica o quanto penetra a influência das condições térmicas na superfície do sólido e no escoamento do fluido. Da mesma forma que no caso cinético, a camada que está em contato com a superfície adota a temperatura da superfície e vai influenciar na temperatura das camadas adjacentes até uma distância da superfície ( $y = \delta_t$ ) onde o efeito torna-se desprezível.

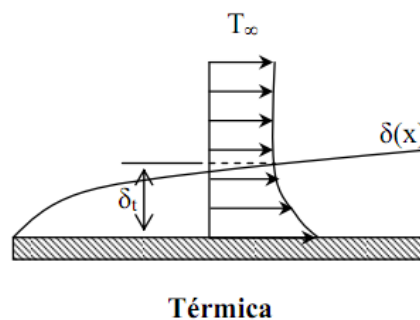


Figura 3.22. Camada limite térmica (ORDENES, 2008)

### 3.9.2.2 Parâmetros adimensionais da convecção

O coeficiente de convecção 'h' é uma constante de proporcionalidade que resume as condições nas camadas mais próximas à superfície. Os processos da camada limite térmica e cinética são complexos e para determinação de h se tornaria muito trabalhoso se fosse incluir todas as variáveis envolvidas.

Em vista disso, a comunidade científica por meio de investigações teóricas e experimentais, ao longo do tempo, desenvolveu expressões envolvendo grupos adimensionais representando de uma forma simples as leis fundamentais da transmissão de calor por convecção, Quadro 3.5.

Quadro 3.5. Coeficientes adimensionais (TORREIRA, 1980)

<b>Grupo</b>	<b>Equação</b>
<b>Reynolds (Re)</b>	$\frac{\rho \cdot V_{\infty} \cdot x}{\mu}$
<b>Nusselt (Nu)</b>	$\frac{h \cdot L}{k}$
<b>Prandtl (Pr)</b>	$\frac{C_p \cdot \mu}{K}$
<b>Grashof (Gr)</b>	$\frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_{\infty}) \cdot L^3}{\nu^2}$

O número de Reynolds indica se o regime é laminar ou turbulento e possui definições de faixas de valores dependentes do tipo de estudo realizado. O número de Reynolds é uma medida do grau de agitação e, portanto deve-se esperar que nas equações referentes a movimento turbulento o número de Reynolds possua maior importância. O número de Nusselt representa o aumento da transferência de calor através da camada do fluido como resultado da convecção em relação à condução de calor no fluido.

O número de Grashof contém o coeficiente de dilatação térmica, sendo portanto uma expressão da diferença de densidade quando há variação de temperatura e por isso do grau de convecção natural. O número de Reynolds não se aplica ao estudo de convecção natural tendo grande importância o número de Grashof para avaliar o coeficiente “h” de convecção natural.

O número de Prandtl define a razão de momento de difusividade “ $\nu$ ” e a difusividade térmica “ $\alpha$ ”. O número de Prandtl fornece uma medida da efetividade relativa do momento e o transporte de energia nas camadas limites de velocidade e térmica, respectivamente (INCROPERA, 2003). Esse número depende diretamente dos fluidos, e é fornecido por tabelas.



### 3.9.2.3 Convecção Forçada

É definida como a transferência de calor que ocorre na movimentação dos fluidos sobre a superfície por meio da ação de agentes externos como ventiladores e vento, por exemplo. Conforme aumenta a velocidade do fluido pode ser classificada em laminar ou turbulenta e isso irá depender da geometria, da rugosidade superficial, da velocidade de escoamento, da temperatura da superfície e do tipo de fluido. Para condição de escoamento laminar é necessário que o escoamento do fluido seja organizado, sendo possível identificar as linhas de correntes bem definidas. O escoamento turbulento é caracterizado por um movimento altamente irregular na camada limite, apresentando flutuações de velocidade e essas variações aumentam as taxas de transferência de calor por convecção, Figura 3.23.

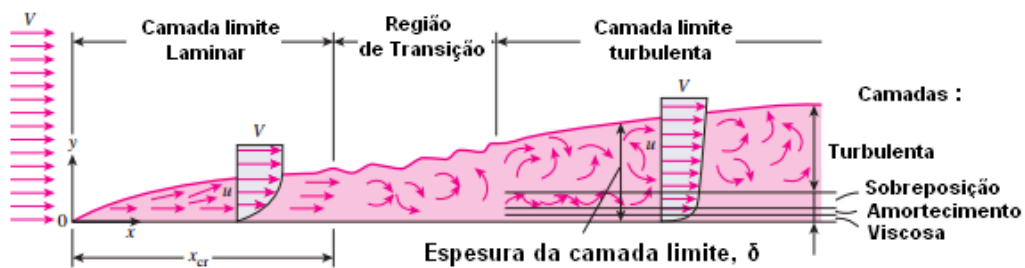


Figura 3.23. Desenvolvimento da camada limite para escoamento ao longo de uma placa plana e os diferentes regimes de escoamento (CENGEL, 2012)

Existem estudos da transferência de calor em regime turbulento por métodos numéricos, um dos mais usados é o modelo K-E que apresenta boa confiabilidade, baixo custo computacional e traz como desvantagem um tratamento simplificado imposto pelas leis de parede incapazes de simular os complexos mecanismos de produção e dissipação de energia cinética de turbulência, resultando em perda de informação sobre a dinâmica do escoamento na região modelada. A complexidade varia com a intensidade dos gradientes de velocidade, pressão, temperatura, geometria do contorno físico do escoamento e também com o comportamento termodinâmico dos fluidos envolvidos no processo.

Segundo Contijo (2009) diferenças de temperatura em até 18°C são insuficientes para alterar de forma significativa a viscosidade dinâmica, a massa específica e a condutividade térmica do ar.

A camada limite turbulenta também pode se desprender do sólido por uma variação brusca de pressão ou geometria fazendo com que surjam regiões de recirculação onde as taxas de troca de calor calculados com base no uso de analogias clássicas são subestimadas, Figura 3.24.

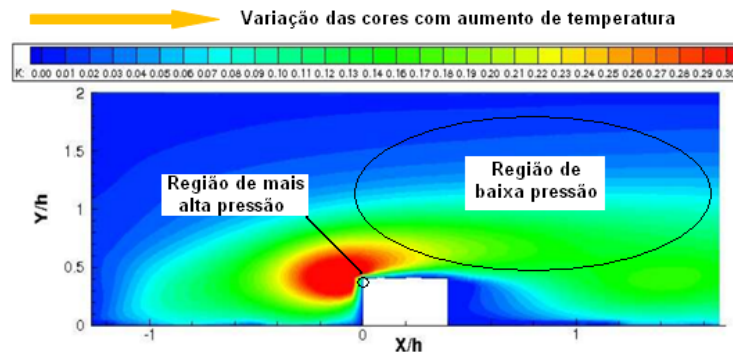


Figura 3.24. Aumento da temperatura devido ao aumento da energia cinética no canto de ângulo reto superior do corpo rombudo (DRAIN; MARTIN, 1995)

A Figura 3.24 mostra a variação de temperatura causada por uma zona de baixa pressão, na região de recirculação posterior ao corpo rombudo de secção quadrada.

Na outra extremidade do corpo rombudo existe um aumento de energia cinética devido à turbulência, causando forte aumento da difusão térmica nessa região e aumentando a temperatura. Dependendo da geometria pode-se alterar de maneira diferente a distribuição e a concentração do calor, o que resulta em características diferenciadas na transferência de calor.

#### 3.9.2.4 Convecção Natural

A troca de calor ocorre também pelo movimento do fluido, mas nesse caso o fluido não é forçado externamente por bombas, ventiladores mecânicos ou do vento. São duas situações em que a convecção natural é originada: o peso próprio do fluido (campo gravitacional) e as forças devido às diferenças de densidade do fluido relacionado com sua variação de temperatura.

Se a temperatura da superfície é maior que a do ar. Uma camada de ar mais próxima à superfície adota uma temperatura maior que  $T$ . Isto produz uma expansão do fluido, diminuindo sua densidade. Então as forças devidas ao gradiente de densidade de massa (forças de empuxo) induzem uma camada limite de convecção

na qual o fluido aquecido ascende verticalmente, isso pode ser visto na placa vertical da Figura 3.25.

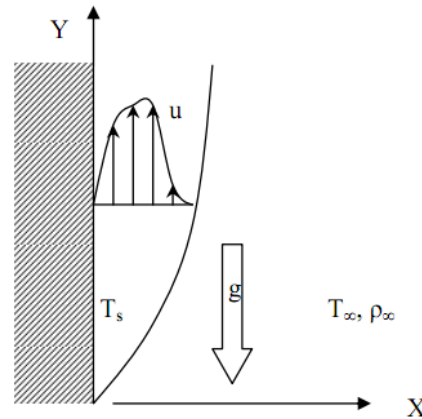


Figura 3.25. Fluido próximo a superfície em convecção natural (ORDENES et al., 2008).

As taxas de escoamento em convecção natural são geralmente menores que as de convecção forçada e a taxa de transferência de calor entre a superfície e o fluido também é menor. Concluindo-se, portanto, que a camada de ar próxima à superfície apresenta uma considerável resistência térmica.

### 3.9.3 Radiação

A radiação ocorre sem que haja contato entre os corpos, há somente transmissão de energia. Essa energia transmite-se em forma de ondas eletromagnéticas através de radiação térmica. A radiação solar sofre alteração no seu percurso pela atmosfera, já que 34% é refletida ao espaço, 47% é absorvida pela Terra e 19% é absorvida na atmosfera pelos seus componentes (pó, nuvens, vapor d'água) (DARÉ; NEME, 2005).

A radiação térmica trata-se da energia emitida na forma de ondas eletromagnéticas por qualquer corpo de temperatura acima de zero absoluto (ARMELIN; CHERY, 2004). Propagam-se em linha reta, refletem, são absorvidas, interferem, apresentam espalhamento de feixe, podem ser enfocadas e viajam no vácuo a uma velocidade de aproximadamente 300.000.000 m/s (SANTOS, 2006). Assim ocorre o processo de irradiação que engloba os processos das contribuições espectrais de reflexão, absorção e transmissão do calor.

A habilidade de um corpo emitir energia radiante é chamada de emissividade que é uma característica de uma superfície e que depende não apenas do tipo de material, mas da condição da superfície e do comprimento de onda em que a radiação é emitida, o que por sua vez depende da temperatura do corpo. O objeto que irradia maior quantidade de energia possível em uma determinada temperatura é conhecido como corpo negro. Na prática os corpos reais não são corpos negros e tendem tanto a emitir, transmitir quanto a refletir a radiação Figura 3.26. A emitância de um corpo real, a mesma temperatura, é sempre menor do que a de um corpo negro (OLIVEIR, 2010).

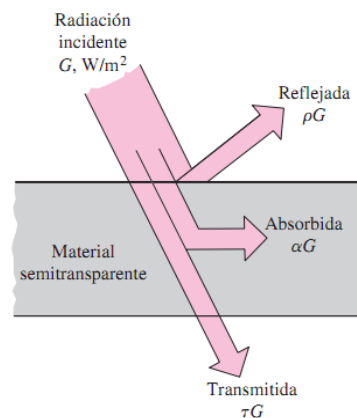


Figura 3.26. Dispersão da radiação incidente (CENGEL, 2012)

Quando uma superfície possui uma emissividade conhecida a uma dada área superficial, uma temperatura  $T_s$  é completamente delimitada pela superfície maior (ou preta) a uma temperatura  $T_{cir}$  separadas por um gás que não intervêm na radiação. Então a taxa líquida de transferência de calor por radiação entre essas duas superfícies é dada pela Equação 3.6.

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s (T_s^4 - T_{cir}^4) \quad (3.6)$$

Onde:

- $\dot{Q}$  - Taxa de transferência de calor por radiação (W);
- $A_s$  - Área da superfície de contato por radiação (m<sup>2</sup>);
- $T_s$  - Temperatura da superfície (K);

$T_{\text{cir}}$ - Temperatura do meio circulante (K);

$\varepsilon$  - Emissividade da superfície;

$\sigma$ - Constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67051 \cdot 10^{-8}$  (W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>).

Nesse caso a emissividade da superfície envolvente não tem nenhum efeito sobre a transferência de calor líquida por radiação.

Segundo Cavalcanti (2011), a **emissividade** depende fortemente da natureza da superfície, que pode ser influenciada pelo método de fabricação e reações químicas com o ambiente.

Segundo Cengel (2012) ao contrário da emissividade, a **absorção** de calor é independente da temperatura da superfície. A absorvidade varia com a temperatura e com o tipo de material, em materiais não condutores elétricos em geral ela diminui com a temperatura. Segundo Modest (1993), a absorção da radiação térmica na superfície dos materiais é função da quantidade de elétrons livres presente.

A **reflexão** de radiação de uma superfície em sólidos opacos é um fenômeno superficial. O isolamento de superfície é utilizado em telhados, ampolas de garrafas térmicas, satélites, isolamento de alimentos, vidros de residências e veículos, sendo todos esses isolamentos explorados em função da refletividade dos materiais metalizados. Superfícies não metalizadas também refletem radiação. Segundo Michels (2007) o ângulo de inclinação de uma superfície que reflete a radiação em relação à radiação que incide nesta, tem influência no fluxo de calor.

A **transmissividade** do calor tem relação com a capacidade do material deixar passar o calor por radiação. Os vidros com baixo teor de ferro, por exemplo, transmitem 90 % da radiação na faixa visível, mas são opacos à radiação infravermelha de comprimentos mais longos. Esse fenômeno acontece com meios semitransparentes como plásticos e até mesmo na camada atmosférica resultando no chamado efeito estufa (CENGEL, 2012).

### 3.10 Jatos incidentes sobre superfícies

Jatos incidentes em superfícies produzem altas taxas de transferência de calor, e por isso, são largamente empregados industrialmente. O uso de jatos incidentes em processos de aquecimento, resfriamento e secagem são encontrados em várias

aplicações, nas quais se destacam-se a secagem de papel; a têmpera de vidro; o aquecimento ou resfriamento de metais; o resfriamento de palhetas de turbinas e componentes eletrônicos; e a combustão em meio catalítico (SILVA, 1999).

Segundo Guerra (2004) diversos parâmetros são utilizados para expressar a transferência de calor de um jato incidente sobre uma superfície de uma placa, alguns desses parâmetros podem ser: número de Nusselt, número de Reynolds, número de Prandtl, espaçamento placa-bocal e distância do ponto de estagnação. Em adição a esses parâmetros, outros efeitos considerados são a geometria do bocal, o confinamento, a turbulência e a dissipação de temperatura do jato.

### 3.10.1 Regiões características do jato

Jatos incidentes envolvem três regiões de escoamento, uma região de jato livre, uma região de deflexão, também chamada de região de estagnação, e uma região de jato livre, chamada de região de jato de parede, devido ao fato do jato já ter colidido na parede, Figura 3.27. Essas regiões são de difícil previsão numérica e por essa razão jatos incidentes são utilizados como métodos experimentais para avaliar modelos de turbulência (COOPER et al., 1993).

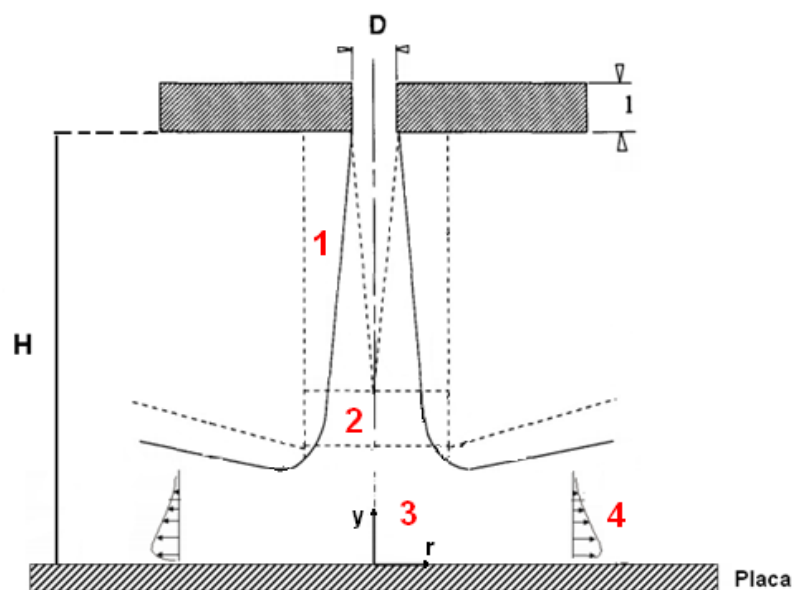


Figura 3.27. Regiões do jato incidente: 1- Núcleo potencial, 2- Região de jato livre, 3- Região de deflexão ou de estagnação e 4- Região de parede livre (adaptado JAMBUNATHAN et al., 1992)

A região de **Núcleo potencial (1)** é uma zona de fluxo de fluido, em que o jato choca-se com o ar ambiente e reduz sua velocidade, momento em que o jato apresenta maior energia cinética. Essa mistura ou região de corte envolve um núcleo, onde a velocidade do fluido na linha central do bico é quase igual à velocidade de saída do bocal (JAMBUNATHAN et al., 1992). Segundo Gautner et al. (1970), com base em uma pesquisa que abrangeu um grande intervalo de números de Reynolds turbulentos, concluiu-se que a região de núcleo potencial possui comprimento de seis diâmetros do bocal.

Na região de **Jato livre (1)** ocorre toda energia cinética produzida pelo fluido devido a deformação normal. À medida que o escoamento se aproxima-se da parede, a velocidade em sua linha de centro vai caindo até chegar a zero no ponto de estagnação. O jato, ao aproximar-se da superfície da placa, provoca uma região de **Deflexão (2)** desse jato, mudando de axial, quando saiu do bocal, para radial. Essa deflexão provoca uma região de forte curvatura das linhas do escoamento. Abaixo do ponto de estagnação, o escoamento aproxima-se muito da **Região de parede (3)** e a energia turbulenta aumenta graças a deformação cisalhante principal, que é muito grande nas proximidades da superfície (TAVARA, 2011).

Alguns estudos, realizados por Goldstien et al. (1986), sobre transferência de calor para um jato de ar assimétrico, mostraram que a máxima transferência de calor ocorre na região de estagnação, onde existe um espaçamento placa-bocal em torno de oito vezes o diâmetro do bocal. Como resultado os autores apresentaram uma correlação para a transferência de calor na superfície dada por uma lei de potência. Segundo Mazurek (2001) quando o jato está situado a valores maiores  $H/D = 8,3$ , ele é considerado completamente desenvolvido. Beltaos e Rajaratnam (1977) observaram que, entre 5,5 e 8,3 tem-se uma fase de transição e o jato ainda está em desenvolvimento.

### 3.10.2 Classificação dos jatos

Os jatos podem ser confinados ou não confinados. Em jatos incidentes confinados o fluido que sai do bocal é de mesma natureza do fluido envolvente, em jatos livres os fluidos são diferentes. Nos confinados, a dinâmica do escoamento será diferente, pois uma camada cisalhante forma-se na interface entre o jato e o fluido envolvente, essa camada cisalhante é instável e gera turbulência. Nos jatos livres esse

tipo de instabilidade, geralmente, não é importante, além dos movimentos turbulentos na camada cisalhante não possuem um efeito substancial no escoamento (GUERRA, 2004). A Figura 3.28 mostra os dois tipos de configuração de jatos.

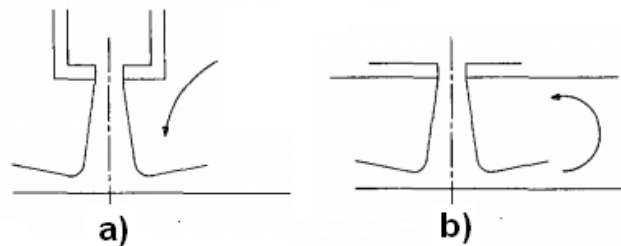


Figura 3.28. Diagrama esquemático a) jatos não confinados e b) jatos confinados (JAMBUNATHAN et al., 1992)

Obot et al. (1982) mostraram que o confinamento faz com que haja uma redução da taxa de transferência de calor, que aumenta com o aumento da taxa de fluxo. Com a relação à distância diâmetro bocal  $H / D = 6$ , e distância radial  $r / D = 6$  ocorre uma redução de 4% na transferência de calor, devido ao fluxo de confinamento que ocorreu a um número de Reynolds de 29.673 e a uma redução de 10 por cento que ocorreu com  $Re = 50.367$ . O dado parece mostrar que essa redução é menor quando  $H / D = 6$ .

Colucci e Viskanta (1996), ao estudarem os efeitos da geometria do bocal nos coeficientes de transferência de calor local para os casos de jatos incidentes confinados a pequenas distâncias entre o bocal e placa, com número de Reynolds na faixa de 10.000 a 50.000 e com experimentos similares para jatos não confinados, observaram que os coeficientes de transferência de calor em jatos confinados são mais sensíveis ao número de Reynolds e aos espaçamentos placa-bocal do que obtidos em jatos não confinados.

### 3.10.3 Correlações estudadas

Na literatura existente sobre jatos incidentes, que serão apresentadas a seguir, há muitas configurações de ensaio, pois ocorrem variações na distância entre bocal e placa, no formato do bocal, no tipo de fluxo, na velocidade e nas configurações de jato estabilizado e não estabilizado. Em muitos estudos



experimentais encontrados, há uma grande diversidade na configuração dos aparatos experimentais, o que dificulta a possibilidade de comparação entre os dados obtidos ou, ainda, a verificação de expressões já propostas para o comportamento do coeficiente de transferência de calor. Nos estudos computacionais observa-se que os resultados numéricos obtidos através de modelos de turbulências diferenciais, como o k-E e os que recorrem a uma modelagem direta do tensor de Reynolds, não prevêem satisfatoriamente o coeficiente de transferência de calor próximo à região de incidência. Diante destas dificuldades experimentais e teóricas, verifica-se que ainda não existe um completo entendimento da dinâmica do escoamento de jatos incidentes (GUERRA, 2004).

Jambunathan et al. (1992) ao estudar jatos circulares, incidindo sobre uma superfície plana para distâncias placa bocal de 1,2 a 16 vezes o diâmetro do bocal e sobre uma região de escoamento de até 6 vezes o diâmetro do bocal, a partir do ponto de estagnação com Reynolds, variando de 5.000 a 124.000, concluíram que as correlações existentes para o coeficiente de transferência de calor expressam o número de Nusselt em função do número de Reynolds elevado a um expoente de valor constante multiplicado por uma constante, conforme a Equação 3.7 abaixo:

$$\text{Nu} = K \cdot \text{Re}^a \quad (3.7)$$

Onde o expoente 'a' deve ser uma função do espaçamento placa bocal (H/D) a partir do ponto de estagnação e da distância radial (x/D), Nusselt então estará em função de Reynolds H/D, x/d e Pr. A constante K assume valores variáveis para cada tipo de experimento.

A literatura apresenta consideráveis estudos para as correlações entre Nusselt e Reynolds, as quais o expoente "a" possui valores característicos para jatos confinados e não confinados, incidindo sobre placas planas. São investigados números de Nusselt, local e médios, no ponto de estagnação em função de Reynolds do bocal do jato. Huang e El-Genk, (1994) investigando a transferência de calor em jatos não confinados encontraram Nusselt médio proporcional a  $\text{Re}^{0,76}$ . San et al. (1994) encontraram medidas do número de Nusselt local, em jatos de ar circular confinado, incidindo sobre uma placa plana aquecida, e, com isso, concluíram que o número de Nusselt do jato confinado é proporcional a  $\text{Re}^{0,638}$  e que é fortemente influenciado pelo diâmetro do bocal, mais tarde no mesmo

laboratório, San e Shiao (2006) encontraram o mesmo valor. Li e Garimella (2001) ao investigarem Nusselt médio para jatos confinados encontraram proporcionalidade a  $Re^{0,483}$  bem próximo dos valores encontrados por Lin et al. (1996), com valor de 0,5. Lytle e Webb (1994), estudando jatos não confinados e investigando, também, a proporcionalidade entre Reynolds e Nusselt encontraram para Reynolds expoente igual a 0,53. Anwarullah et al. (2012) ao estudarem o efeito da distância bocal à superfície em jatos não confinados sobre uma placa de alumínio, desenvolveram uma equação com expoente de 0,5 para Reynolds local com correlação com Nusselt. O Quadro 3.6 especifica melhor as características para cada valor de expoente de Reynolds na correlação com Nusselt, com as devidas configurações de tipo de experimento e para H/D, X/D, considerando geometria circular do jato e incidência sobre placas planas para cada autor comentado acima.

Quadro 3.6. Expoente entre Nusselt e Reynolds e configurações de experimento

<b>Autor</b>	<b>Configuração</b>	<b>Nusselt</b>	<b>Exp. Reynolds</b>	<b>H/D</b>	<b>X/D</b>
<b>Goldstein et al. (1986)</b>	Não confinado	Médio	0,76	>6	0,5 a 32
<b>Lytle e Web (1994)</b>	Não confinado	Médio	0,53	>6	/
<b>Lin et al. (1996)</b>	Confinado	Médio	0,50	1 e 8	/
<b>Li e Garimella (2001)</b>	Confinado	Médio	0,48	1 e 5	/
<b>San Shiao (2006)</b>	Confinado	Local	0,63	1 e 6	1 a 32
<b>Anwarullah et al. (2012)</b>	Não confinado	Local	0,50	2 e 10	/

Estudos por métodos numéricos realizados por Muthukannan et al. (2016) considerando um jato de ar vertical sobre um bloco com disposição de confinamento limitado por duas paredes, demonstraram uma correlação entre Nusselt e Reynolds para Nusselt médio, com expoente de 0,5 para Reynolds confirmando valores iguais e aproximados aos apresentados no Quadro 3.5 obtidos por métodos experimentais.

Percebe-se grande interesse em obter correlações para o número de Nusselt em escoamento de jatos incidentes. A grande maioria de estudos está focada em jatos não confinados sobre superfícies planas, explorando a distância entre bocal e placa, os tipos de bocais com suas variações geométricas e as placas aquecidas, estudando-se o resfriamento. Nesse trabalho serão abordadas as variações entre Nusselt e Reynolds com distância e formato de bocal fixo, com configuração H/D =

7,7 para variações de rugosidades nas superfícies de cada placa em estudo, utilizando-se da espuma rígida de poliuretano para confecção das amostras, pela sua facilidade de usinagem e baixo custo.

### 3.10.4 Métodos experimentais

As configurações de testes experimentais são diversificadas, mas predomina sempre a possibilidade da variação do distanciamento entre placa e bocal, e as placas de estudo são geralmente de aço. Há estudos, envolvendo técnicas por câmeras termocromáticas e técnicas por fio de fumaça, em que possibilita-se visualizar e fotografar os jatos. Os jatos de ar podem ser pressurizados ou gerados por ventiladores, confinados ou não confinados, como já comentado anteriormente. Os métodos vistos, nas Figuras 3.29 e 3.30, são para jatos confinados e não confinados respectivamente, os dois métodos utilizam ar comprimido que são liberados por válvulas dosadoras, de acordo com fluxo que deseja-se inserir no sistema, há também a possibilidade de regulação do distanciamento entre bocal e placa que são aquecidas com resistências elétricas.

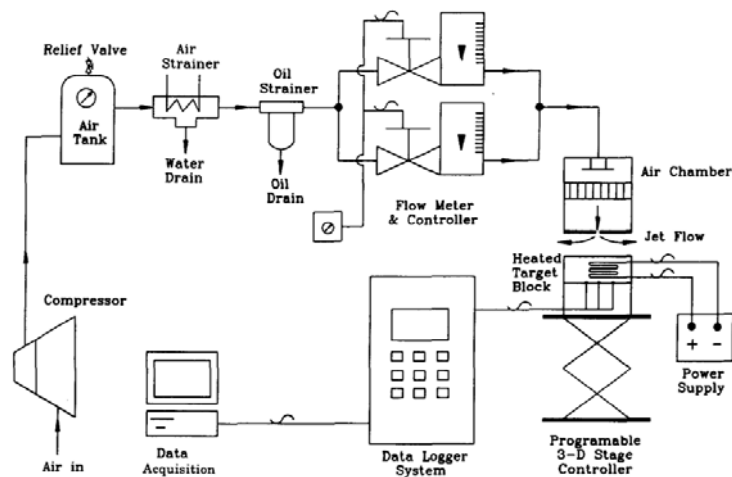


Figura 3.29. Configuração de ensaio com jato confinado com ar pressurizado (LIN et al.,1995)

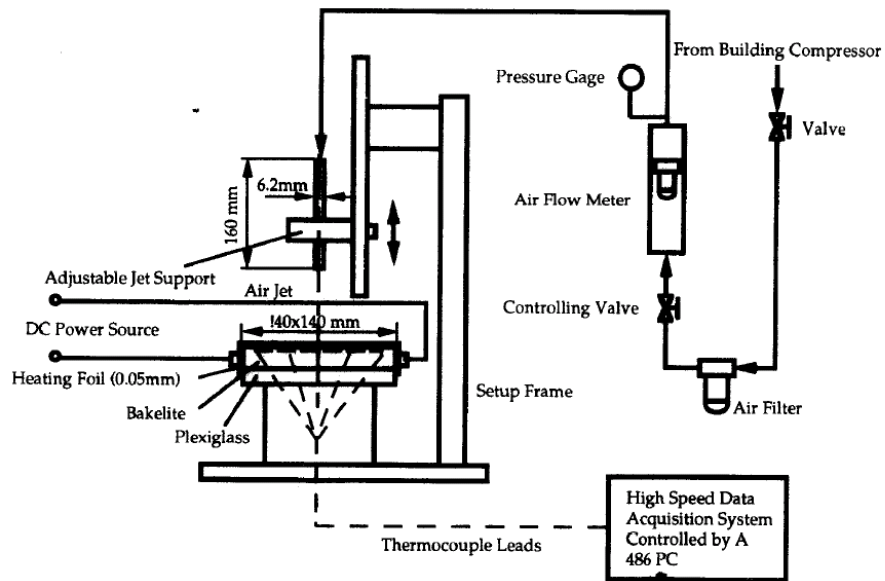


Figura 3.30. Configuração de ensaio de jato não confinado com ar pressurizado (HUANG et al., 1994)

No caso do método do experimento da Figura 3.31, o jato é fornecido a placa aquecida por resistência através de um ventilador centrífugo, configurando também um experimento de jato confinado. Na configuração da Figura 3.32, também de jato confinado, a análise é realizada por câmeras termográficas sem a utilização de placa aquecida, e são avaliadas as temperaturas do jato aquecido na saída do bocal, com possibilidade também de ajustar o distanciamento do bocal no caso da câmera.

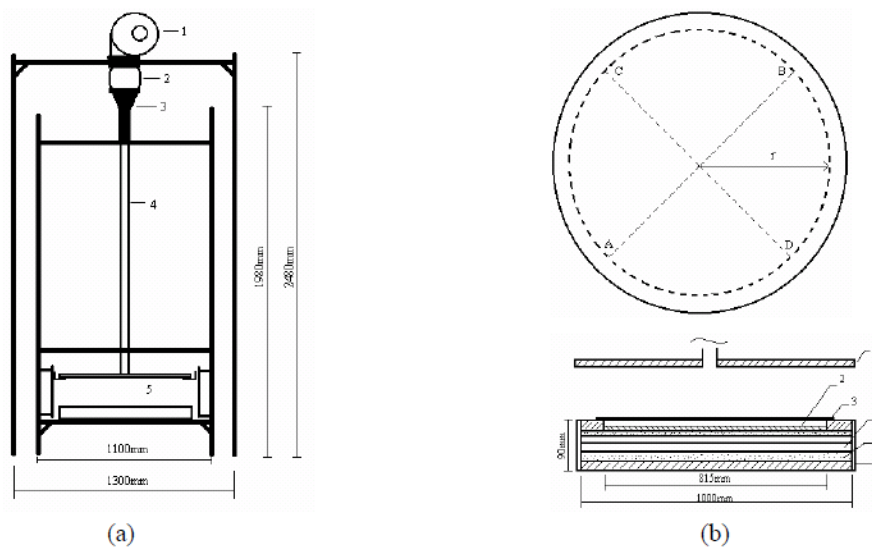


Figura 3.31. Configuração de ensaio com jato confinado e ventilador centrífugo (GUERRA, 2004)

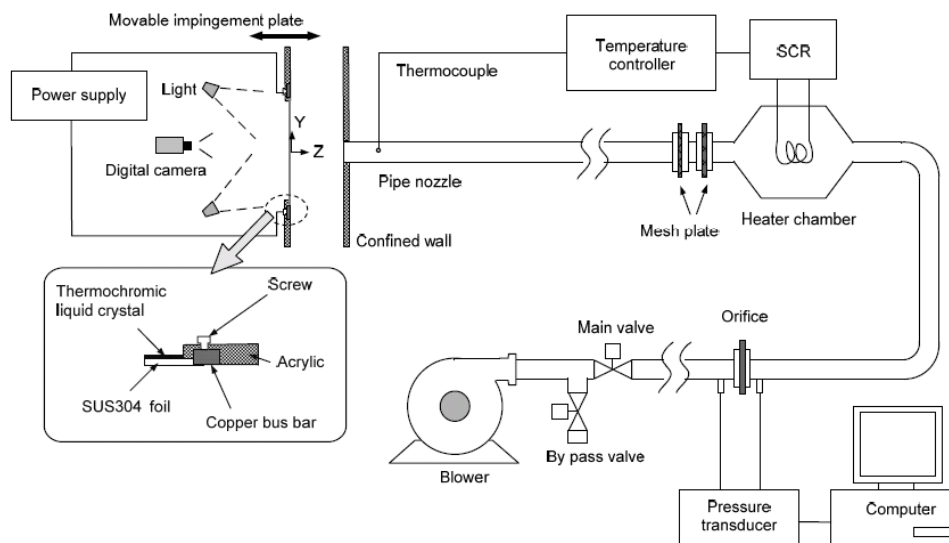


Figura 3.32. Configuração de ensaio de jato confinado com ar pressurizado (HUANG et al., 1994)

Os métodos existentes estudam processos para melhorias em arrefecimento, analisando as variações das configurações de ensaio, principalmente a distância, entre placa e bocal, para melhorar as condições de aumento de turbulência, otimizando, assim, o resfriamento de uma superfície. Em experimentos que utilizam placas há uma limitação da quantidade de sensores com a área física da placa, o que atenua uma melhor observação dos fenômenos superficiais. Também não é possível determinar de maneira adequada e direta o calor transmitido através da espessura da placa, pois não existem câmaras isoladas uma da outra e com controle de temperatura, assim uma análise de transferência de calor unidimensional mais precisa fica menos viável.

### 3.11 Termografia

A radiação térmica pode ser emitida nas faixas de ultravioleta, visível, infravermelho e até na faixa de microondas do espectro eletromagnético. Entretanto para temperaturas típicas encontradas na Terra a maior parte de radiação térmica é emitida dentro do infravermelho (CHRZANOWSKI, 2001 apud SANTOS, 2006).

A termografia permite a medição à distância e sem contato das temperaturas superficiais dos objetos observados, bem como a visualização da distribuição dessas temperaturas, ou seja, a forma em que elas se manifestam nesse objeto. Todos os corpos acima do zero absoluto ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) emitem calor, que é constantemente

absorvido e reemitido por nós e por tudo o que nos rodeia. Termografia é o termo usado para descrever o processo de tornar essas radiações térmicas visíveis e susceptíveis de interpretação e utiliza a banda espectral dos infravermelhos (CARAMALHO, 2012).

A termografia através dos seus equipamentos de análise como o termovisor e câmeras termográficas detectam a radiação infravermelha emitida pelo objeto inspecionado, que é invisível ao olho humano e transformam em imagens térmicas visíveis, com a possibilidade de convertê-la em leituras de temperatura (MALDAGUE, 2001)

O termovisor capta a radiação infravermelha das superfícies dos materiais utilizando-as como sensor de análise, que podem ser estudadas posteriormente pelo software do aparelho, possibilitando saber as temperaturas médias ou pontuais em determinada região de escolha dentro da matriz de pontos do termovisor.

### **3.11.1 Sistema óptico**

Os termovisores são aparelhos que formam termogramas, que são imagens que permitem visualização da distribuição de temperatura da superfície focalizada e que representam as temperaturas dos corpos de prova em cores. A imagem obtida com o termógrafo é provida de escala que correlaciona cor e temperatura, sendo assim possível a obtenção de resultados esclarecedores quanto aos problemas ligados direta ou indiretamente à temperatura.

A radiação é coletada por um arranjo óptico fixo e dirigida a um detector térmico que converte a radiação incidente em um sinal de natureza elétrica. A lente é utilizada para focalizar a imagem. O filtro seleciona a banda de comprimento de onda para o qual o termômetro é sensível. Um amplificador amplia o sinal de saída do detector e um indicador de temperatura analógico ou digital mostra o valor medido, Figura 3.33 (SANTOS, 2006).

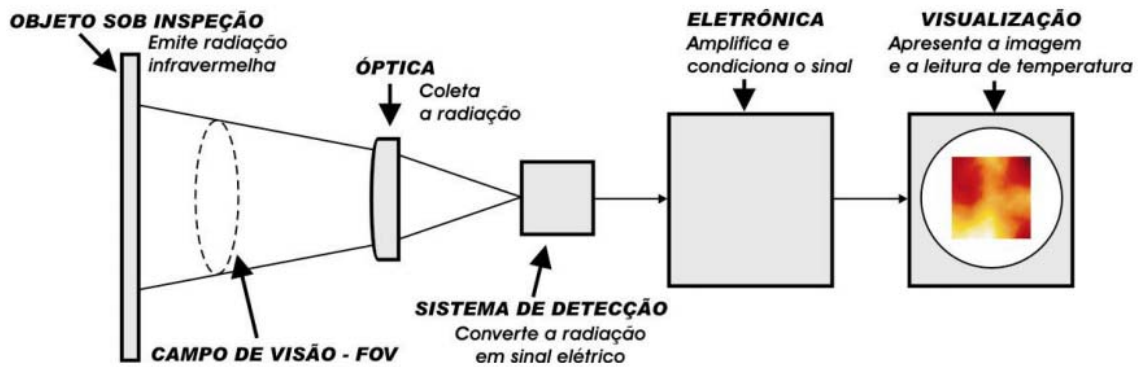


Figura 3.33. Sistema de funcionamento de um termovisor (SANTOS, 2006)

### 3.11.2 Classificação quanto ao tipo de termografia e sensores

A termografia se classifica em ativa quando não há fluxo de calor através do material e serve para avaliar materiais ou componentes que são termicamente estáticos, nesse caso todos os pontos estão a temperatura ambiente. Na termografia passiva, se utiliza o fluxo de calor existente na amostra, um exemplo são os sistemas de energia por onde passa corrente elétrica e gera calor (AMMIRATO; ZAYICEK, 2006 apud OLIVEIRA, 2010).

Quanto à formação da imagem pode ser considerado um sistema com varredura e sem varredura, no primeiro caso a imagem é formada ponto a ponto através de um conjunto de espelhos giratórios implicando uma varredura com grande complexidade mecânica, a imagem nesse caso é obtida pelo deslocamento do feixe, produzindo uma linha completa e sequencial, sucessão de pontos, utilizando-se de um scanner que move-se pelo campo de visão.

No segundo caso, os sistemas sem varredura, existem um grande número de sensores que captam todos os pontos das imagens em um sistema matricial, esses sistemas substituem os sistemas mecânicos e podem ser por detectores térmicos ou por fótons (CARAMALHO, 2012).

No sistema de detector infravermelho de matriz podem ser citados os detectores de fótons, onde a resposta de leitura é rápida, mas em contrapartida são grandes e pesados necessitando de refrigeração e operando apenas em comprimento de onda curto (INFRATEMP, 2015).

Nos detectores térmicos o material sofre alguma alteração nas propriedades físicas e geram um sinal elétrico na saída, possuem tempo de resposta longo e são independentes do comprimento de onda com a radiação, como exemplo podem ser citados os piroelétrico, termopilhas e microbolômetros. Nos primeiros, o material, quando aquecido pela radiação incidente, produz uma carga entre as faces e a pulsação da radiação produz uma corrente alternada que é proporcional ao aumento da radiação incidente.

Os do tipo termopilhas são termopares colocados em série onde aparece uma diferença de potencial entre dois condutores diferentes expostos à mesma variação de temperatura onde um lado é exposto à radiação e outro é isolado da radiação, de modo a se obter medidas de intensidade de energia radiante através dos valores obtidos pela diferença de potencial.

E os últimos são basicamente resistores que tem sua resistência alterada com a variação de temperatura (OMEGA ENGINEERING, 2008 apud OLIVEIRA, 2010). O organograma da Figura 3.34 resume a classificação comentada sobre termografia.

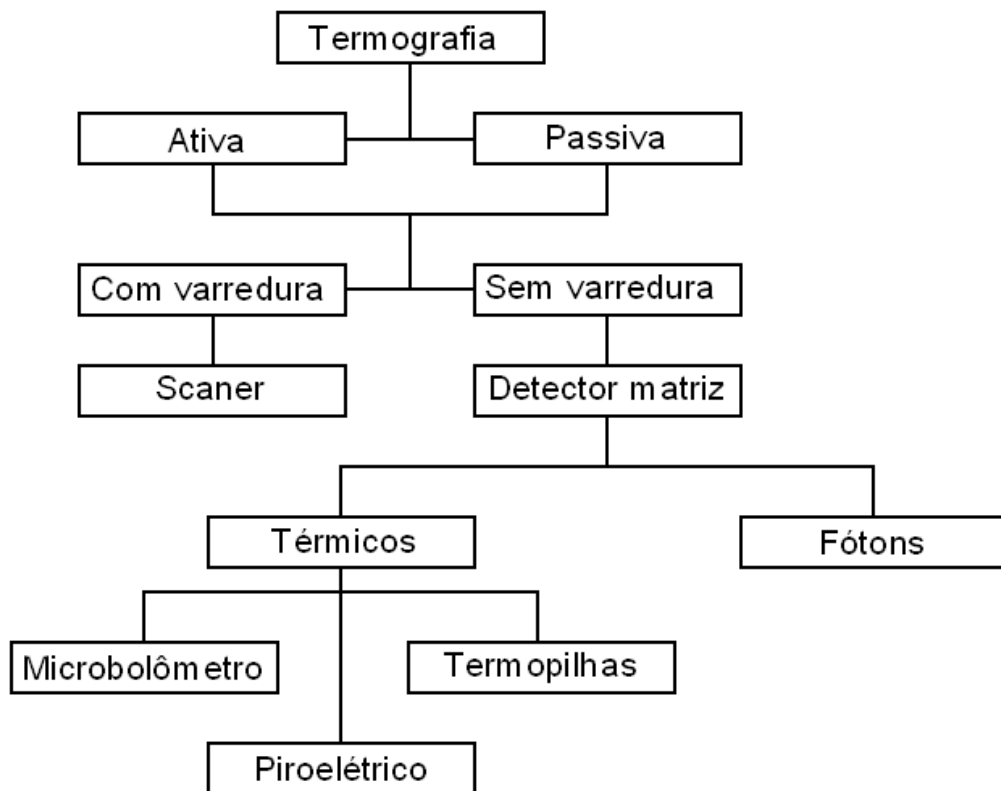


Figura 3.34. Diagrama de classificação em termografia (adaptado OLIVEIRA, 2010)



### 3.11.3 Especificações dos termovisores

Definir corretamente que tipo de aparelho termovisor se adapta a cada situação é imprescindível para efetuar uma análise térmica adequada. Não bastam efetuar análises sem um prévio conhecimento das especificações do equipamento, pois existem, em cada caso, especificações e condições de operação que devem ser observadas com coerência em cada aparelho e superfície a ser estudada. O Quadro 3.7 mostra algumas dessas especificações e suas particularidades. A seguir serão dados maiores detalhes quanto às especificações de formação de imagem, resolução espacial e faixa espectral.

Quadro 3.7. Características importantes de um termovisor (adaptado SANTOS, 2006)

<b>Tipo de onda</b>	<b>Características</b>
<b>Faixa de temperatura</b>	É comercializada a faixa de leituras de -20 a 500°C acima desse valor Máximo a radiação entra no espectro do visível.
<b>Faixa espectral</b>	As bandas espectrais mais usadas em termografia são de 0,9 a 2,5/2,5 a 5 e de 7 a 14 devido as condições da atmosfera.
<b>Resolução espacial</b>	As áreas IFOV e FOV são fornecidos em graus pelo fabricante e correspondem respectivamente a menor porção de área projetada e a área total projetada.
<b>Resolução da medida</b>	É o menor objeto que pode ter sua temperatura medida com exatidão a uma determinada distancia.
<b>Sensibilidade</b>	Menor diferença de temperatura que pode ser detectada depende das propriedades do sistema óptico da resposta do detector e do nível de ruído do sistema o sistema é mais ruidoso em baixas temperaturas e a resolução da temperatura diminui. Termovisores com resposta espectral de 3mm a 5mm tendem a ter sua sensibilidade mais prejudicada do que termovisores com resposta espectral de 8mm a 14mm.
<b>Taxa de repetição</b>	Número de vezes que a imagem é atualizada pelo termovisor em um segundo. Baixas taxas de repetição produzem imagem borrada quando existe um movimento relativo entre o termovisor e o objeto sob inspeção.
<b>Temp. de operação</b>	É a temperatura que o fabricante garante as especificações fornecidas e o adequado funcionamento do termovisor, a faixa de temperatura de -15 a 50°C atende adequadamente as necessidades nacionais.

### 3.11.3.1 Formação de imagem

A digitalização da imagem em coordenadas espaciais é denominada de amostragem da imagem pela dimensão do arranjo e a resolução espacial. Quanto maior for a dimensão, maior será a imagem, quanto maior for a resolução maior serão os detalhes discerníveis na imagem. A imagem digital é uma aproximação da imagem contínua, quanto maior o número de pixels utilizados para representar a mesma imagem maior será sua resolução.

Em um aparelho termovisor, cada pixel da matriz em questão corresponderá a uma temperatura aferida, que será processada em tonalidades de cores diferentes para exibir via aparelho ou pelo software. As cores mais quentes em um termovisor aparecerão em vermelho, alaranjado e amarelo brilhante.

As imagens termográficas são obtidas com sensores térmicos do tipo microbolômetros e detectam comprimentos de onda na faixa do infravermelho. O arranjo desses microbolômetros formarão a imagem se estiverem dispostos no plano focal adequado. Cada bolômetro ficará associado a um pixel da imagem formada. Atualmente tem-se adotado arranjos de microbolômetros em matrizes de 160 x 120, 320 x 240 ou 640 x 480 (OLIVEIRA, 2010).

### 3.11.3.2 Resolução espacial e distância de operação

O menor detalhe que pode ser percebido depende do tamanho do detector e da óptica do sistema. O IFOV (instantaneous Field of View) que é a projeção de um pixel na superfície observada. O conjunto de IFOV forma o campo total de visão (FOV), ou seja, é a área total que pode ser vista pelo termovisor, o FOV geralmente é declarado em graus pelo fabricante, Figura 3.35.

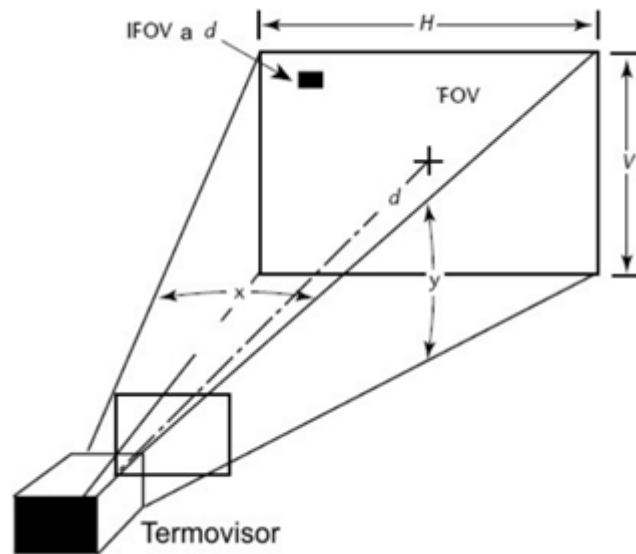


Figura 3.35. Campo de visão (FOV) e campo de visão instantâneo (IFOV) de um termovisor.  
(MALDAGUE, 2001)

Podem-se efetuar cálculos para as seguintes situações:

- IFOV segundo a Equação 3.8.
- Distância máxima que um objeto pode ser detectado pelo termovisor Equação 3.9.
- Distância máxima que um determinado objeto pode ter sua temperatura determinada com exatidão Equação 3.10.

$$\text{IFOV} = \frac{\text{FOV}}{\text{Pix}} \quad (3.8)$$

$$\text{Dist}_d = \frac{\text{Dob}}{\text{IFOV}} \quad (3.9)$$

$$\text{Dist}_d = \frac{\text{Dob}}{\text{MIFOV}} \quad (3.10)$$

Onde:

IFOV- Campo de visão instantâneo (mrad);

FOV – Campo de visão (mrad);

Pix – Número de pixels;

- Dist<sub>d</sub> – Distância máxima de um objeto (m);  
 MIFOV – Campo de visão instantâneo de medida;  
 Dob – Tamanho do objeto sob inspeção (m).

### 3.11.3.3 Faixa espectral de termografia

Apesar da atmosfera ter uma transparência considerável à luz visível, o mesmo não ocorre com a radiação infravermelha. A radiação ao atravessar a atmosfera sofre absorção pelo oxigênio, dióxido de carbono e vapor de água. Com essas absorções forma o espectro de transmissão da atmosfera. Além da absorção, sofre também variações quanto à dispersão, emissão e turbulência. Existem duas regiões do espectro onde a transmissão da radiação é mais elevada, que situam-se na região entre 3 e 5 microns e na zona entre 8 e 13 microns.

Com os avanços da tecnologia utiliza-se uma banda a mais para análises. O Quadro 3.8 mostra as principais bandas utilizadas.

Quadro 3.8. Comprimento de onda e aplicações (CARAMALHO, 2012)

<b>Tipo de onda</b>	<b>Comp onda (µm)</b>	<b>Aplicações</b>
<b>Onda curta</b>	0,9 a 2,5	Muito bom em trabalhos de investigação, restauração de peças de arte, aplicações militares.
<b>Onda média</b>	2,5 a 5	Bom para inspecionar equipamentos através de vidros e acrílicos.
<b>Onda larga</b>	7 a 14	Bom para examinar equipamentos no exterior de instalações com presença de sol, em zonas onde há presença de reflexos solares.

Também existem subgrupos dentro dos grupos principais, em aplicações industriais se usa 3,5 a 5 e 7,5 a 14 ou 13 conforme o fabricante sendo que os outros detectores são utilizados em aplicações muito especiais, tanto militares quanto de investigação (CARAMALHO, 2012).

### **3.11.4 Emissividade**

Como os termovisores não medem temperatura e sim radiação emitida, as leituras fornecidas pelo termovisor tornam-se dependentes dessa propriedade. Os valores vão de '0' para um refletor perfeito a '1' para emissor perfeito (SANTOS, 2006). Como visto anteriormente, a emissividade depende do comprimento de onda, geometria da superfície, temperatura e ângulo de incidência. A emissividade é um dos parâmetros mais importantes para se ajustar nos termovisores para se ter uma leitura correta. Existem tabelas de emissividade para vários materiais. Mesmo assim, a superfície desses materiais pode estar oxidada ou por qualquer outro motivo pode não possuir a emissividade indicada pela literatura. Um dos modos para efetuar corretamente a aferição de emissividade é colocar na superfície a ser aferida uma fita preta opaca, geralmente se usa fita para isolamento elétrica. Após deixar estabilizar a temperatura, para que a fita fique a mesma temperatura da superfície a ser medida, ajusta-se no aparelho emissividade 1 para uma superfície negra e afere-se a temperatura. Como essa temperatura é a mesma da superfície fora da área da fita, ou seja, no material a ser aferido, ajusta-se no aparelho a emissividade correspondente a essa temperatura.

### **3.11.5 Fatores ambientais que influenciam as medições**

Além da absorção ocorrida pela radiação infravermelha ao atravessar a atmosfera existem outros fatores importantes a considerar. O Quadro 3.9 exhibe essas condições:

Quadro 3.9. Fatores ambientais e sua influência em termografia (CARAMALHO, 2012)

<b>Causa</b>	<b>Efeito</b>
<b>Radiação Solar</b>	A radiação solar influencia a medição no carregamento solar onde a radiação pode elevar a temperatura do elemento defeituoso fazendo evoluir mais rapidamente para falha e no reflexo solar em metais polidos onde a refletância é alta, assim a radiação da leitura pode ser de uma outra fonte de calor ou da radiação solar refletida pela superfície do componente.
<b>Umidade</b>	Resfria o componente dificultando a detecção, análise e diagnóstico do defeito e atenua a radiação infravermelha emitida pelo componente que chega ao termovisor.
<b>Vento</b>	Diminui a temperatura da superfície em análise. Ventos com velocidade baixa afetam consideravelmente a temperatura.
<b>Temperatura Ambiente</b>	Em dias quentes ocorre um aumento da temperatura do componente tendo uma maior probabilidade de ocorrer falhas por outro lado em dias frios defeitos que poderiam apresentar um pequeno aumento de temperatura podem não ser detectados.

Deve-se procurar atenuar esses fatores de acordo com o tipo de inspeção realizada. Podem-se fazer análises no início da manhã ou no final da tarde para atenuar os fatores de radiação e definir limites de umidade relativa e temperatura ambiente padrão para todas as análises. Quanto ao vento a literatura traz fatores de correção conforme a Tabela 3.4 mostrada abaixo:

Tabela 3.4. Fator de correção para uma placa vertical (CARAMALHO, 2012)

<b>Velocidade do vento</b>		<b>Fator de Correção</b>
<b>m/s</b>	<b>Km/h</b>	
<1	<3,6	1
2	7,2	1,36
3	10,8	1,64
4	14,4	1,86
5	18,0	1,06
6	21,6	2,23
7	25,2	2,4
8	28,8	2,5

Segundo Madding e Lyon (2000 apud SANTOS, 2006) as maiores reduções na temperatura ocorrem a baixas velocidades do vento continuando em queda nas altas velocidades, mas a uma taxa menor.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a viabilidade da utilização da espuma rígida de poliuretano iniciou-se a confecção das superfícies, verificando a usinabilidade, resistência e fidelidade de reprodução dos corrugamentos dos corpos de prova propostos sendo que o restante da metodologia foi consequência do sucesso dessas características. Nesse contexto foi adquirida uma chapa de espuma rígida de poliuretano para confeccionar as amostras com os devidos corrugamentos para teste. Com as amostras fabricadas, atentou-se para o projeto de uma estrutura que garantisse, de modo adequado, os testes experimentais para transferência de calor por convecção forçada e condução entre uma condição de ar quente circulante e outra de ar frio, tendo a possibilidade de controlar as variáveis de temperatura e velocidade do ar através de microcontrolador, além de monitorar as variáveis de controle e de resposta de leitura dos sensores por software supervisorio que ao final do teste gerasse um relatório final do experimento.

A metodologia desenvolvida possibilitou simular condições constantes de velocidade e temperatura do ar, concebidas por uma câmara quente com entradas e saídas de ar aquecido, controladas por turbina e resistência elétrica; e uma câmara fria com temperatura de entrada e saída de ar controladas por ar condicionado a 18°C. As amostras foram acondicionadas em compartimento vedado com temperatura controlada por resistência elétrica a  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ , em consequência do ar seco. Devido ao aquecimento a umidade das amostras, estabilizou em  $55 \pm 3\%$ . Além das análises dos arquivos armazenados pelo software supervisorio, foram também realizadas fotografias infravermelhas das superfícies das placas com termovisor, que depois de capturadas tiveram temperaturas médias definidas através da análise do software do aparelho. O projeto foi direcionado considerando análises de transferência de calor por convecção forçada sob a forma de jatos incidentes e desconsiderando radiação. O fluxograma da Figura 4.1 sintetiza a metodologia do trabalho realizado.

## 4.1 Fluxograma dos procedimentos

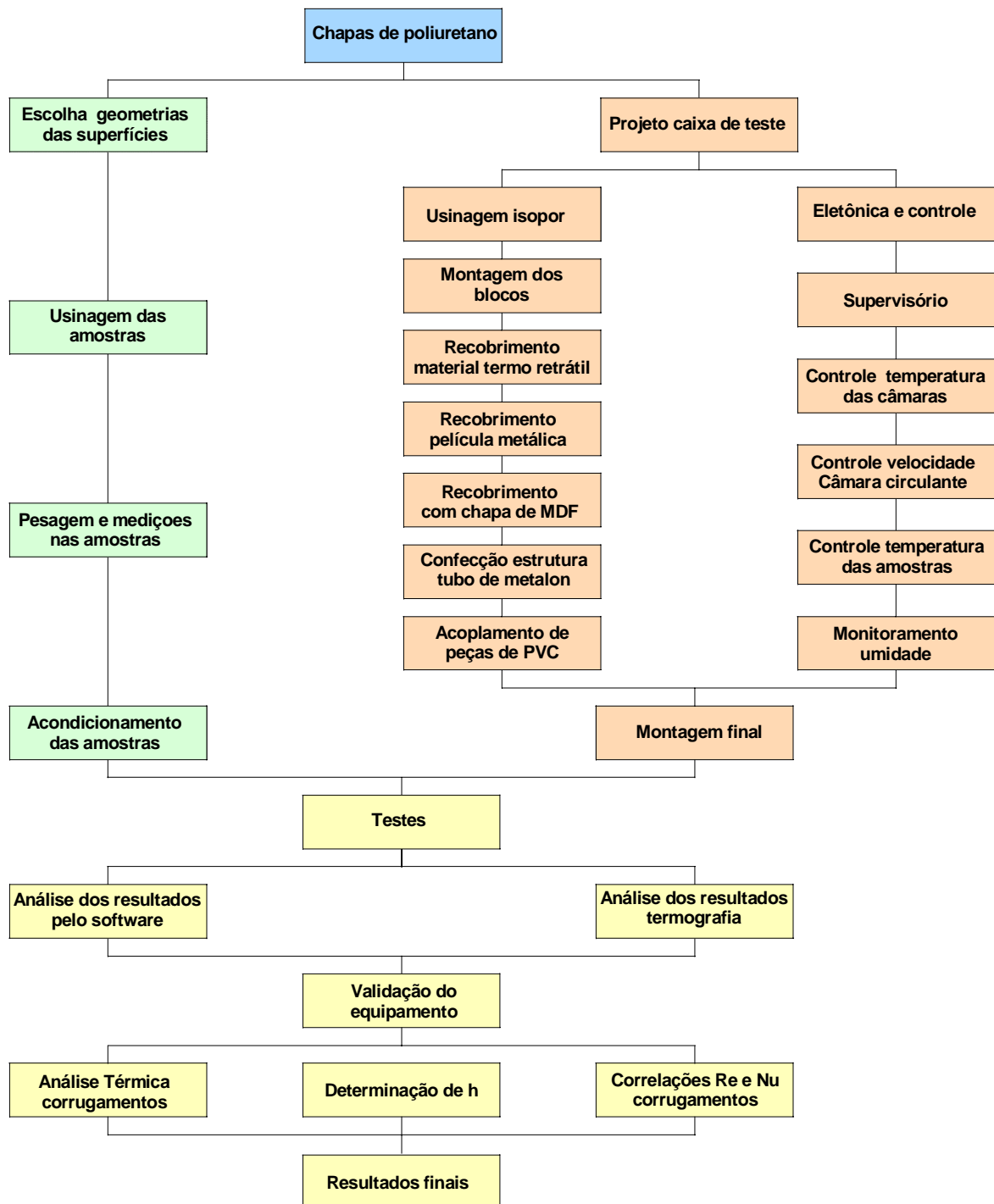


Figura 4.1. Diagrama explicativo dos procedimentos



## 4.2 Amostras para ensaio

As amostras de ensaio foram adquiridas de empresa fabricante de chapas de espuma rígida de poliuretano do segmento frigorífico. O procedimento consiste na fabricação de blocos de poliuretano, pelo processo descontínuo no tamanho de 2,0 x 0,6 x 0,6 metros, no qual as matérias primas são injetadas em máquina semi automatizada, sendo, após, misturadas sob pressão, temperatura e velocidades controladas, em que são derramadas em um molde de estrutura em formato de paralelepípedo com laterais e tampa de aço, robustas e capazes de suportarem a pressão da reação da espuma. Essa estrutura de aço também apresentava furos posicionados estrategicamente para saída de ar, devido ao deslocamento do material, provocado pela reação da mistura, garantindo assim o preenchimento dos espaços vazios entre a espuma e as paredes do molde. Após a cura total do material, cerca de 50 horas, o bloco formado é cortado no sentido longitudinal com serra fita, retirando-se primeiramente uma película na área superficial externa e depois chapas com espessura definida pelo cliente, Figura 4.2.



Figura 4.2. Bloco de poliuretano em corte por serra fita horizontal, [www.espumamaquinas.com.br](http://www.espumamaquinas.com.br)

Após a retirada, da primeira camada superficial constituída de uma película formada entre o molde e a superfície do bloco foi adquirida uma chapa de 2000 x 600 x 20 mm cortada longitudinalmente a 15 mm da superfície da base.

Segundo informação do fabricante, a densidade do bloco que se adquiriu a chapa de espuma expandida com gás de isolamento HCFC (Hidroclorofluorcarbono) varia de acordo com a altura do bloco. Isso ocorre devido ao sentido de crescimento celular, resultando em uma densidade maior na base e na parte superior do bloco devido à compressão do material nas paredes desse elemento, caracterizando desse modo, as propriedades anisotrópicas comentadas no item 3.5.1.4.

Para entender melhor as variações de densidade, considerando o sentido de crescimento da espuma com a altura dentro do molde, podemos imaginar a divisão do bloco em três regiões denominadas “a”, “b” e “c”, conforme esquema da Figura 4.3, considerando-se mais denso na base a região “a”, com valor de  $40 \text{ kg/m}^3$ , na parte em que a amostra foi retirada. Os materiais da mistura para formação do bloco de espuma são: Politane 101 F (Poliol) e Isotane DM (Isocianato), utilizando-se 10 % a mais na mistura de Isotane em relação ao Politane.

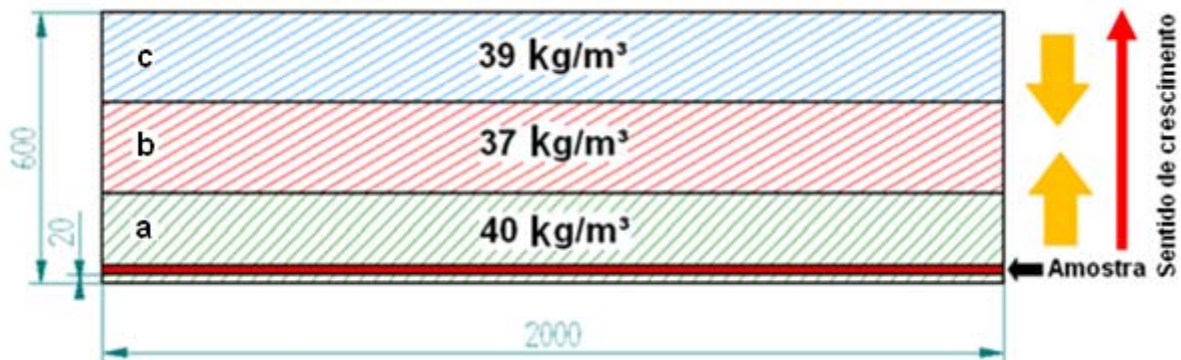


Figura 4.3. Altura de retirada da chapa para confecção das amostras de teste

#### 4.2.1 Escolha da geometria das amostras

Considerando-se corrugamentos possíveis de serem fabricados industrialmente sobre superfícies de variados materiais por processos de grafuagem ou moldagem, foram escolhidos alguns perfis para serem estudados. Investigou-se então efeito desses corrugamentos na transferência de calor por convecção forçada e condução, objetivando encontrar correlações entre as variações de velocidade de ar com o coeficiente de convecção na superfície das placas.

Visando obter resultados provenientes apenas do tipo de geometria superficial proposta, a metodologia adotou analisar amostras de origem da mesma altura de bloco com igual densidade e orientação celular de crescimento, considerando-se também o mesmo número, altura e largura de cristas para as placas rugosas, Figura 4.4. As geometrias superficiais escolhidas podem ser aplicadas em engenharia e obtidas na fabricação de painéis perfilados e moldes de injeção. A placa plana serviu de base para validação do dispositivo proposto sob o estudo de jatos incidentes, sendo tratado detalhadamente a partir do item 4.3.

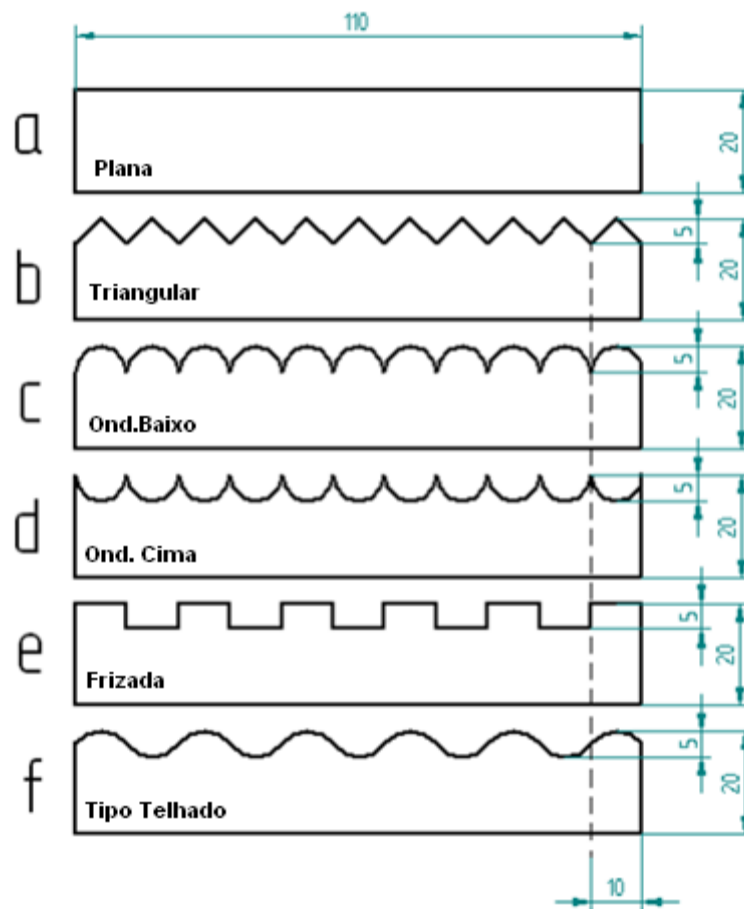


Figura 4.4. Esquema das geometrias das superfícies das amostras nomeadas de 'a a f' com dimensões representadas em mm.

Para o estudo das correlações do número entre Nusselt e Reynolds por convecção forçada sob a forma de jatos incidentes a uma distância fixa entre placa e bocal, estudou-se a relação de proporcionalidade, variando-se apenas as geometrias das placas.

Como visto no item 3.9.2.3, variando-se a geometria superficial podem ocorrer alterações nas zonas de pressão quando a superfície for submetida à incidência de ar em velocidades diferentes de zero, e isso pode alterar, de forma significativa, a transferência de calor. Para caracterizar as chapas de poliuretano quanto à área superficial e quantidade de material envolvido, utilizou-se o software Solid Edge. Os resultados podem ser vistos na Tabela 4.1

Devido às adaptações do projeto, as cristas das amostras da Figura 4.4 passaram de 5 mm para 3,21 mm, e a espessura das amostras passou de 20 mm para 19 mm.

Tabela 4.1. Massa em gramas das placas relacionadas à placa plana

<b>Placa</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Área Sup. (cm<sup>2</sup>)</b>
Plana	8,28	121
Ondulada Baixo	7,85	147,5
Frisada	7,63	156,31
Triangular	7,63	135,28
Telhado	7,63	128
Ondulada Cima	7,13	151

#### **4.2.2 Confeção das amostras**

Padronizou-se em 110 x 110 mm a área para realização da análise de inspeção das amostras e optou-se em reservar uma área de vedação três vezes maior. com artifício de redundância, para que a transmissão do calor, através da espessura da placa, pudesse ser considerada na direção unidimensional e transmitida somente pela área de inspeção, excluindo a possibilidade de fugas laterais para o meio externo e entre as câmaras nas regiões de encaixe.

Em virtude disso, optou-se por considerar uma área de borda envolvendo a área de inspeção três vezes maior. A confecção das amostras foi realizada por máquina CNC, nas medidas 220 x 220 x 19 mm, Figura 4.5.

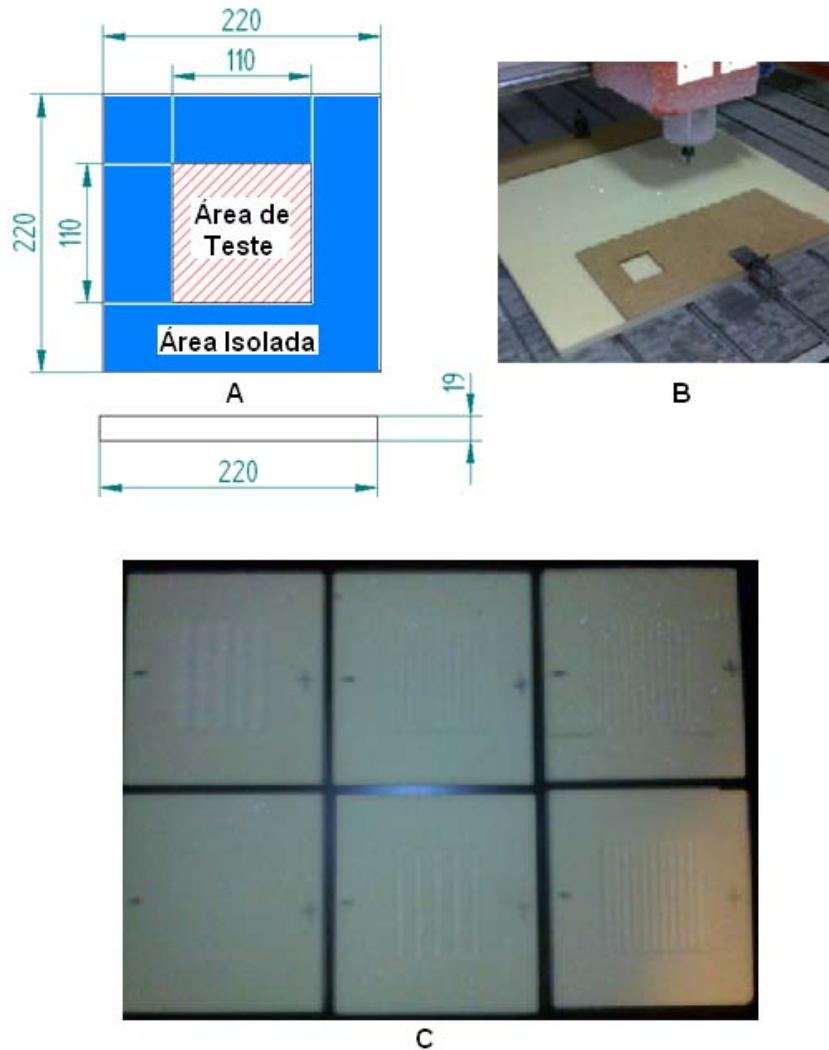


Figura 4.5. Esquema dimensional das amostras em (a), processo de usinagem na fabricação das placas e em (b), amostras confeccionadas com as devidas geometrias (c)

O sucesso da usinagem do poliuretano foi alcançado, pois com as altas velocidades de corte tem-se um excelente acabamento. Tanto para desbaste, quanto para acabamento foram utilizadas velocidades de 24 rpm e avanço de 6.000 mm/min, com ferramenta de topo reta de 4mm, topo esférica de 2mm e topo de 0,3 mm com ângulo de 5 graus.

A confecção das amostras de espuma de poliuretano poderia ser realizada pela inserção de quantidades medidas de isocianato e polioli em moldes bipartidos. No entanto, esse caminho não foi escolhido pois poder-se-ia obter densidades diferentes nas amostras devido a uma imprecisão da medida de quantidade de matéria prima de polioli ou isocianato, já que antes da mistura, esses materiais

deveriam ser pesados separadamente e misturados manualmente podendo um ou outro ficar fora das proporções percentuais exatas para formação de uma densidade padronizada para todas as amostras, o que poderia acarretar em mudanças na condutividade térmica do material. Além disso, haveriam mais pontos negativos como: gastos para confecção de moldes, dificuldades no preenchimento de todos os espaços vazios do molde, dificuldade em obter uma temperatura constante para reação e gastos com desmoldantes.

Sendo assim, a padronização das amostras para o estudo seria melhor garantida com a aquisição de chapas retiradas a uma mesma altura do bloco e a confecção das geometrias rugosas por máquina CNC, tornando, assim, possível uniformizar a densidade e a dimensão das amostras estudadas.

### **4.3 Projeto da estrutura para os experimentos**

Para estudar a transferência de calor por convecção forçada sob a forma de jatos incidentes confinados, projetou-se uma estrutura de estudo com uma condição de circulação de ar quente e outra com condição de circulação de ar frio. Na câmara de circulação de ar quente, os dutos de ar tiveram temperatura e velocidade do ar controlados por resistência elétrica; e na câmara circulante de ar frio a temperatura foi controlada por ar condicionado. Esse controle foi satisfatório para simular condições em regime permanente, possibilitando analisar imagens termográficas das superfícies corrugadas através de janelas de inspeção localizadas nas extremidades de ambas as câmaras.

Estudou-se primeiramente a distância focal para fotografar as imagens infravermelhas com utilização de termovisor, sendo construído uma estrutura em papelão com mesmo volume de ar contido em uma das câmaras. Encontrada a distância adequada de focalização entre termovisor e a superfície de análise e, considerando o posicionamento de sensores em locais específicos para monitorar as medições de temperatura e umidade, projetaram-se as câmaras. Com o uso do software Solid Edge pôde-se projetar a estrutura da Figura 4.6. A estrutura das câmaras consiste em uma estrutura de poliestireno (isopor) com densidade de 20 kg/m<sup>3</sup>.

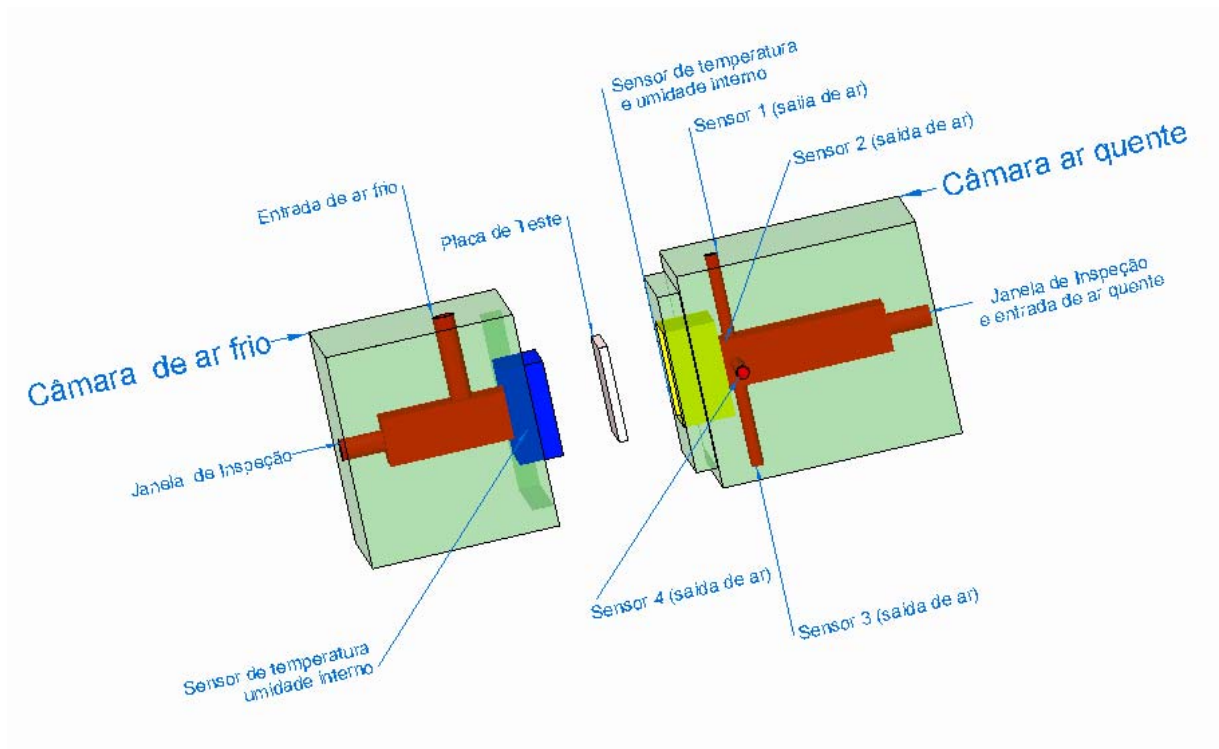


Figura 4.6. Esquema das câmaras com os blocos de isopor e com posicionamento de sensores e janelas de inspeção das câmaras circulantes de ar quente e frio

As câmaras foram feitas com encaixes redundantes entre as mesmas para que não houvesse transmissão de calor na placa fora da área de inspeção de 110 x 110 mm.

Foram adquiridos oito blocos de isopor de densidade 20 kg/m<sup>3</sup> que foram usinados e montados, como veremos no próximo item. Para dar suporte aos blocos, contemplou-se o envolvimento deles com películas termo retráteis e chapas de MDF, que por sua vez, ficariam de suporte aos flanges e tubos de PVC colocados nas entradas e saídas de ar e nas janelas de inspeção.

Também foi projetado um compartimento vedado para acondicionamento das amostras em temperatura controlada, por resistência e umidade monitorada por microcontrolador. Toda a estrutura foi sustentada com perfil de tubo quadrado de metal 30 x 40 mm, para que fossem instaladas as câmaras. Na câmara fixa, instalada diretamente na estrutura, foi adaptado motor e resistência e na câmara móvel sobre os trilhos uma abertura superior para entrada de ar refrigerado por ar condicionado, Figura 4.7 ilustra o esquema geral da estrutura.

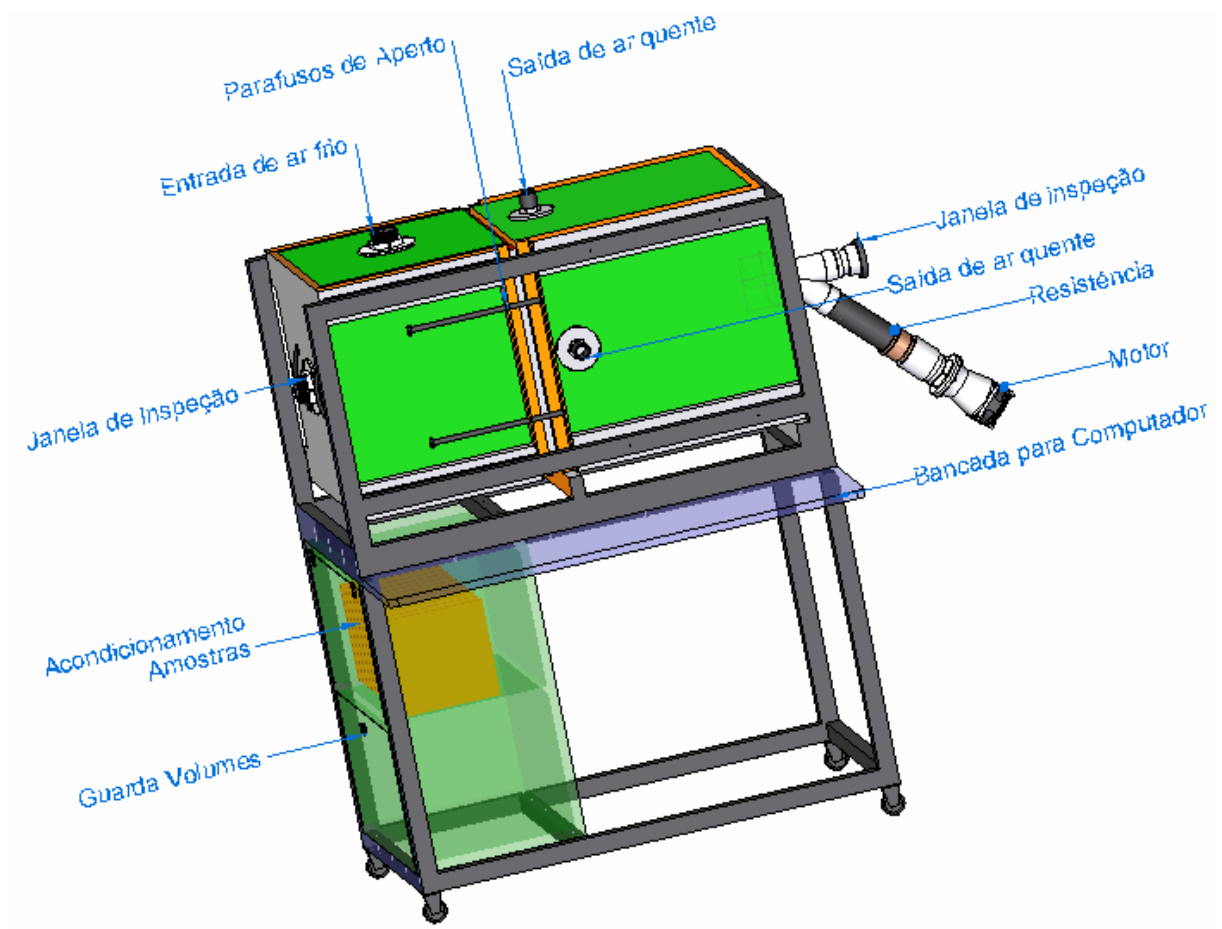


Figura 4.7. Esquema da estrutura mecânica da metodologia com as câmaras e acondicionamento de amostras em estrutura de MDF e estrutura metálica

A câmara fria foi constituída com duto de admissão de ar frio na parte superior, o qual permaneceu sempre aberto para realização dos experimentos feitos. O ar frio do ambiente, controlado por ar condicionado circulava entre admissão superior e possuía saída pelo duto de inspeção, sendo que no momento de registro das imagens termográficas era colocada a janela de inspeção e logo após retirada, para que retornasse a circulação de ar frio.

Dependendo do meio de análise de temperatura com termovisor, como visto no item 3.11.1, podem ocorrer alterações nas medições, desse modo a análise da temperatura, através das janelas de inspeção na câmara fria deveria ser realizada do mesmo modo que na câmara quente, em que a janela permanecia conectada em todo período de realização do experimento.

A câmara quente possuía distância entre a placa e o bocal (H) (local de posicionamento do termovisor), sendo 385 mm e diâmetro do bocal (D) sendo de 50



mm. O estudo de jato confinado sobre placas apresentou relação de distância da placa bocal  $H/D = 7,7$ , que, segundo a literatura discutida no item 3.10.1,  $H/D = 8$ , caracteriza um jato completamente desenvolvido com turbulência máxima na região da placa.

Como já discutido, o objetivo foi desenvolver uma metodologia que permitisse procedimentos práticos de teste para estudo de diferentes corrugamentos em superfícies de placas de espuma rígida de poliuretano.

#### **4.3.1 Etapas da implementação**

Realizou-se a usinagem de oito blocos de isopor que foram montados e colados com cola de contato e cola epóxi especial, para esse tipo de material, Figura 4.8(a). Na sequência foi adicionado diretamente sobre as câmaras de poliestireno uma película termo-retrátil de vinil, e sobreposta a ela primeiramente uma película metálica e após chapas de MDF. Em seguida, foram inseridas dutos e conexões de PVC. Com as câmaras prontas foi adaptado uma estrutura metálica para sustentação das duas câmaras, contendo também um espaço para o acondicionamento de amostras. Sequência das figuras 4.8.

O isopor adquirido, de alta densidade, obteve acabamento satisfatório utilizando para a usinagem fresa de diâmetro de 22 mm a 24.000 rpm de profundidade de corte de 8 mm, com avanço de 6.000 mm/min e passe lateral de 14 mm. Como a maior profundidade de usinagem dessa ferramenta era de 70 mm, confeccionou-se um prolongador para a usinagem da maior dimensão, com 120 mm o qual não obteve sucesso, devido ao desbalanceamento do sistema. Para essa profundidade de usinagem utilizou-se, então, uma fresa de 6 mm de diâmetro com 200 mm de comprimento com rotação de 9.000 rpm, a qual desintegrou com passe de 14mm. Na terceira tentativa, com a nova ferramenta de mesmo comprimento, a rotação foi reduzida para 6.000 rpm com avanço de 1.000 mm/min e passe lateral de 5 mm.

O posicionamento da amostra e os encaixes das peças macho e fêmea foram testados em suas medições e em seus encaixes manuais, para excluir a possibilidade de qualquer folga que comprometesse o teste,. O que podemos observar na Figura 4.8 (b) e (c), na qual se observa um encaixe justo entre as peças macho e fêmea e amostra.

Após a montagem e a colagem adequada das peças macho e fêmea (câmara circulante de ar quente e de ar frio), representado na Figura 4.8 (e), as peças foram coladas e envolvidas em um material termo retrátil de vinil e após em uma película metalizada, figura 4.8 (f),(g) e (h).

Na sequência, foram inseridos com cola epóxi os dutos de PVC, que adentraram no isopor e que serviram de suporte para fixação dos flanges que, por sua vez, serviram de suporte para rosqueamento de registros e adaptadores de PVC que seriam colocados posteriormente.

Por fim realizou-se a instalação das câmaras na estrutura de metal sendo a câmara circulante de ar quente fixada na estrutura e a câmara circulante de ar frio parafusada em suas laterais, em trilhos que permitissem a abertura e o fechamento da estrutura para troca de amostras no momento de teste, sendo também aplicados parafusos de aperto final para comprimir a amostra no momento do teste. Figura 4.8 (l).

Em (j) e (l) da figura 4.8, pode-se perceber as câmaras já montadas com as janelas de inspeção e compartimento de acondicionamento das amostras..



a)



b)



c)



d)



e)



f)



Figura 4.8. Usinagem (a); teste de encaixes no isopor e montagem (b), (c), (d) e (e); envolvimento com película termo retrátil (f), (g) e (h) ; etapas de montagem em (i),(j)e (l)

### 4.3.2 Observações de construção

As placas de teste encaixaram com interferência e observando-se mínima folga em alguns pontos sendo de aproximadamente 0,5 mm em seu perímetro, na cavidade do isopor da câmara circulante de ar quente, considerando, dessa forma que vedações entre a placa e os compartimentos de isopor fossem de topo, Figura 4.9 (a) e (b).

O fechamento adequado com aperto necessário entre as câmaras foi realizado por quatro parafusos laterais. Figura 4.9 (c). Para retirada das amostras, era introduzido um tubo de PVC com borracha siliconada na extremidade, através da

espera da janela de inspeção da câmara circulante de ar quente, a qual o tubo fazia batente na superfície da placa, forçando-a sair, Figura 4.9 (d). As saídas de ar da câmara circulante foram colocadas o mais próximo possível da placa para simular adequadamente as condições de jatos incidentes em confinamento em uma placa vertical, Figura 4.9 (e). Na Figura 4.9 (f) pode-se observar, através da espera de admissão de ar quente da câmara, a superfície corrugada da placa de teste com área de 110 mm x 110 mm.

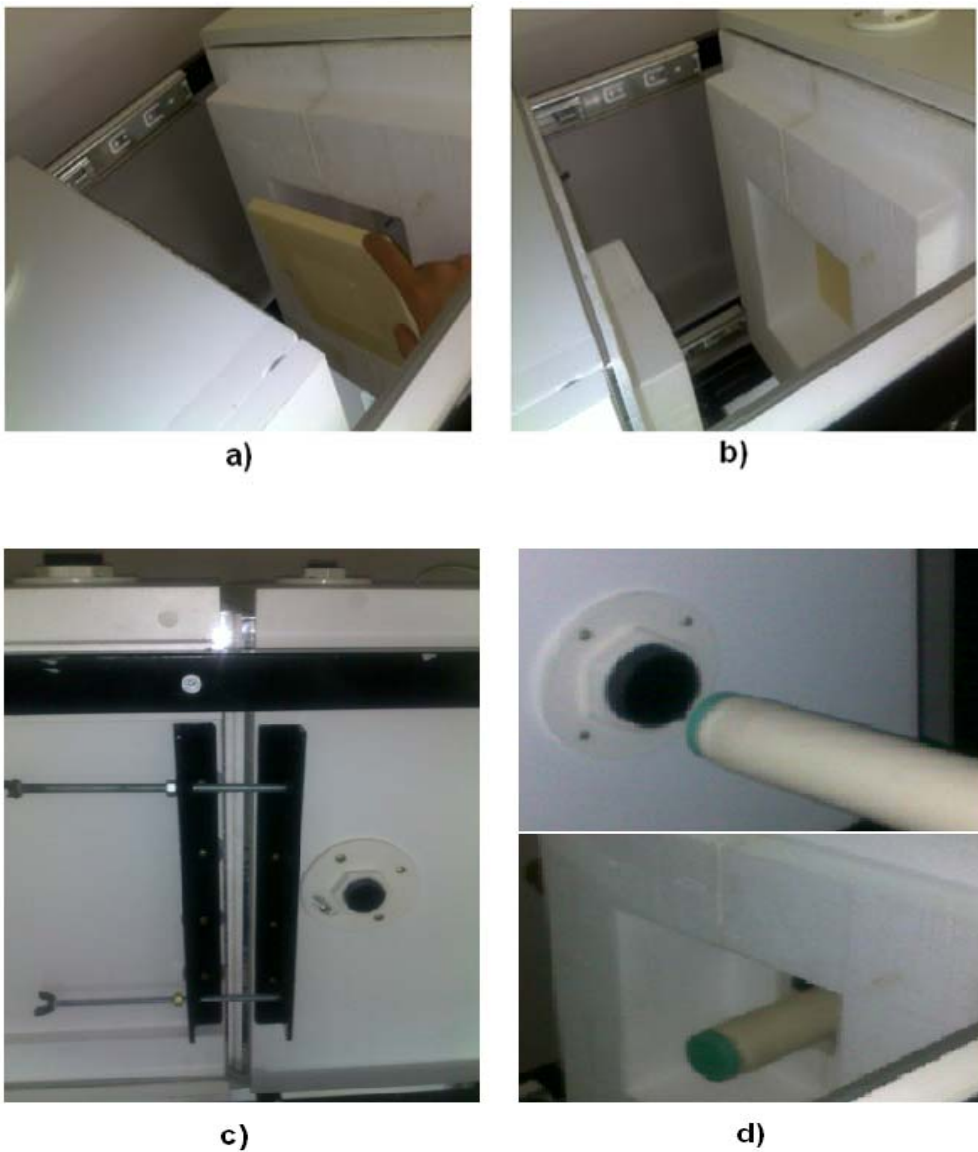


Figura 4.9. Encaixe de amostra em (a) e (b); sistema de fechamento com parafusos (c); sistema de retirada das amostras de teste (d), sistema de saída de ar (e); amostra vista pelo lado de dentro da câmara circulante (d)

continua...



Figura 4.9. Encaixe de amostra em (a) e (b); sistema de fechamento com parafusos (c); sistema de retirada das amostras de teste (d), sistema de saída de ar (e); amostra vista pelo lado de dentro da câmara circulante (d)

### 4.3.3 Desenvolvimento e automação dos experimentos

Foi desenvolvido um sistema supervisor para inserir condições de temperatura e velocidade de teste e coletar leitura dos sensores envolvidos em tempo real bem como para armazenamento das variáveis simuladas para serem analisadas posteriormente.

Foi utilizado o microcontrolador Arduino Mega, onde nove entradas analógicas foram utilizadas para aquisição das leituras de temperatura e umidade dos sensores. Utilizou-se também uma saída PWM para controlar a potência da resistência de aquecimento da câmara circulante e outra saída digital para controlar a velocidade de rotação do motor através de controle por PPM. As variáveis de temperatura, umidade e potência da resistência puderam ser monitoradas em tempo real e foram armazenadas em relatórios para análise posterior, numa planilha eletrônica. O organograma da Figura 4.10 sintetiza o desenvolvimento da automação do projeto.

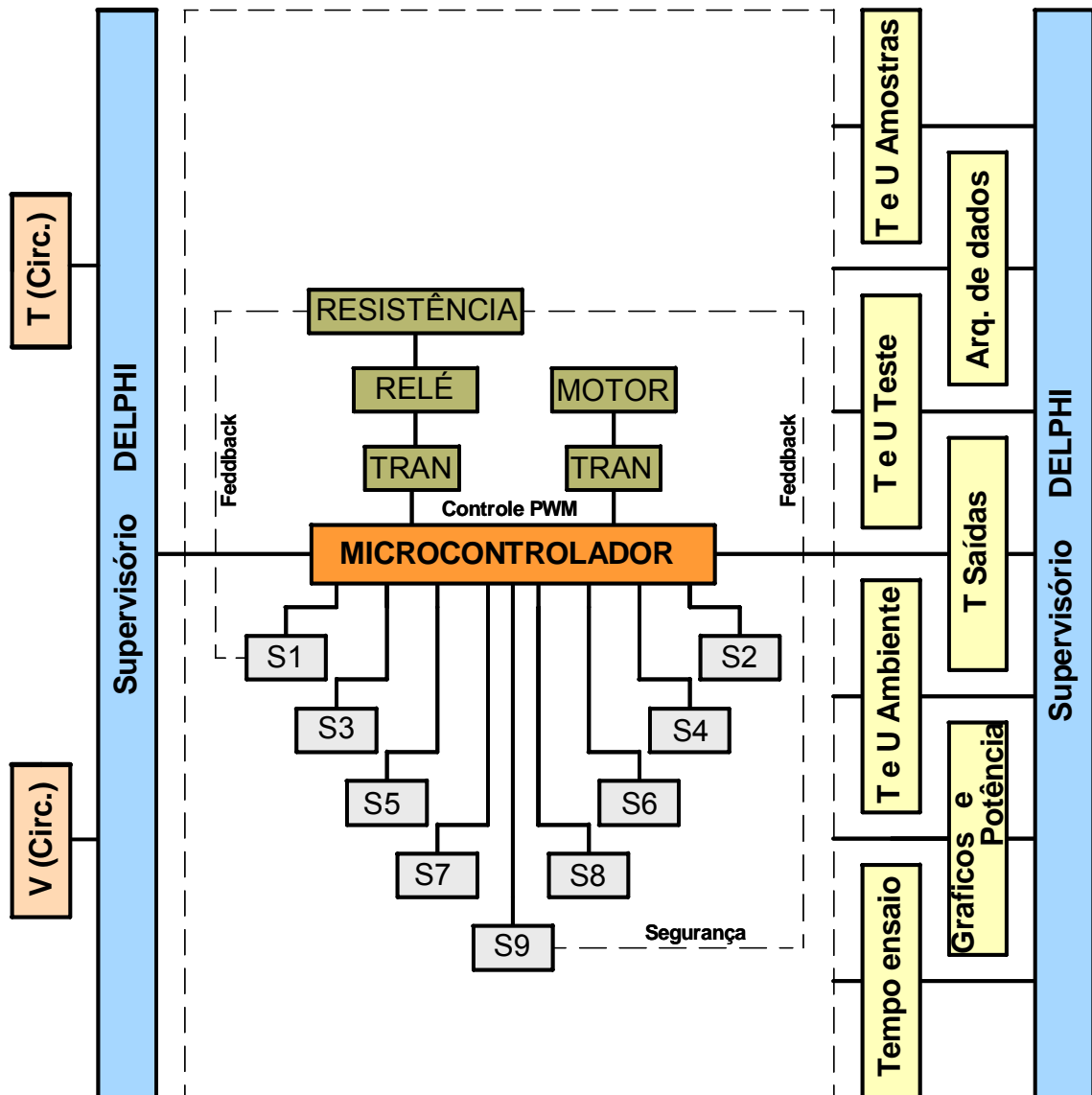


Figura 4.10. Diagrama de blocos explicativo do funcionamento de eletrônica e software supervisorio

#### 4.3.3.1 Supervisorio

O estudo da transferência de calor exige muitas observações e análises, pois é um estudo que possui complexidades, como comentado anteriormente. Necessita-se de precisão e controle de temperatura para obter resultados adequados de teste. Como foi necessário analisar grande quantidade de variáveis e controlar a temperatura, para que ficasse praticamente constante, foi necessário desenvolver



um mecanismo de processamento e armazenamento que pudesse interagir com o usuário de forma que o mesmo pudesse acompanhar as variações de temperatura do ensaio. Por isso foi de grande importância o desenvolvimento de um sistema supervisorio para acompanhamento em tempo real. Para utilizar o programa podia-se escolher a temperatura e a velocidade do ar quente circulante e, também podia-se alterar valores com o sistema em modo de teste. Em virtude disso, o programa foi elaborado com a linguagem de programação em Delphi 7, que, além de monitorar também podia armazenar os dados do ensaio realizado com valores de:

- a) Velocidade do ar da entrada da câmara aquecida;
- b) Umidade e temperatura ambiente;
- c) Temperatura da resistência;
- d) Potência;
- e) Temperatura da câmara circulante;
- f) Temperaturas nas saídas 1, 2, 3 e 4;
- g) Temperatura e umidade da câmara vedada;
- h) Temperatura e umidade do acondicionamento das amostras.

O controle de ar frio foi definido para temperatura ambiente e foi supervisionado por sensor de temperatura e umidade ambiente, como mostra o sistema da Figura 4.11.

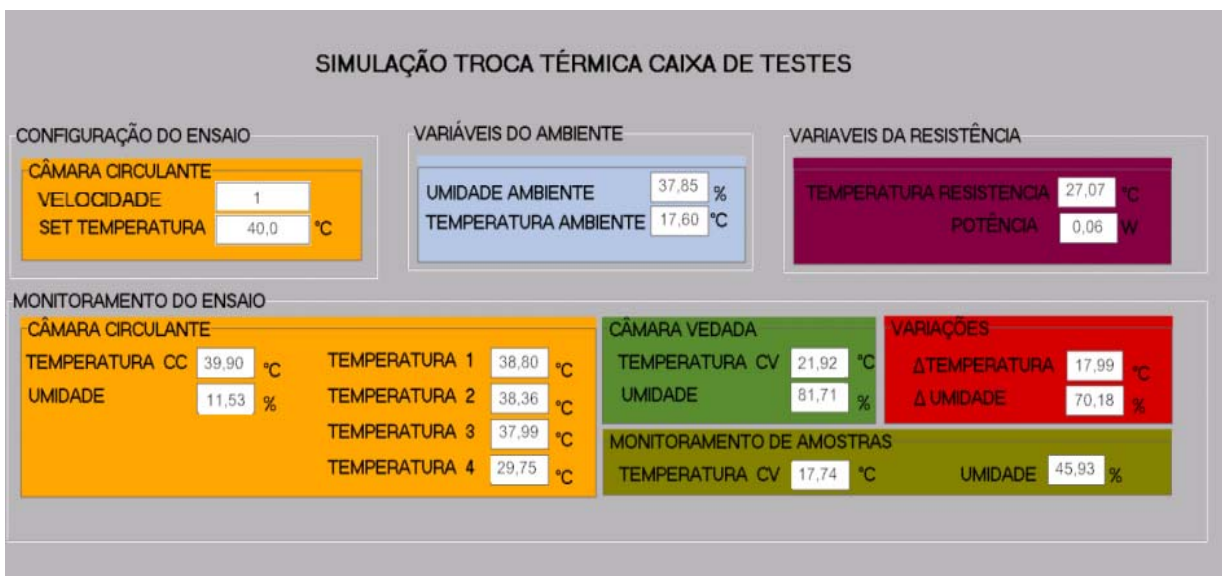


Figura 4.11. Esquema de software supervisorio

#### 4.3.3.2 Potência e aquecimento

Utilizou-se um adaptador de conexão “y” de PVC, em que a primeira extremidade foi acoplada na câmara circulante e a segunda na janela de inspeção, na terceira foi adaptada uma turbina de aeromodelo localizado logo abaixo de uma resistência de 600 W de potência, na qual o ar, impelido pela turbina, aqueceria ao passar pela resistência, Figura 4.12 (a). A resistência ficou apoiada por suporte de porcelana, e com base vazada em acrílico, para tornar possível a passagem de ar por ela, Figura 4.12(b).



**a)**



**b)**

Figura 4.12. Resistência e ventilador utilizados no aquecimento da câmara circulante com adaptadores

Pode-se calcular a potência em cada momento de teste, obtendo-se a energia fornecida ao sistema antes e depois do sistema estabilizar. Sabendo que o produto da resistência pelo quadrado da corrente fornece a potência, aferiu-se a corrente com medidor da marca SECON, com o valor da resistência de  $74 \Omega$ , da resistência de aquecimento, e calculou-se a potência controlada em cada segundo de teste. O interesse em determinar a energia fornecida ao sistema foi para a possibilidade de estimar as perdas de calor e entender melhor o sistema. A



resistência de 600 W adaptou-se adequadamente para os intervalos de velocidades fornecidas pela turbina.

Foi utilizada outra resistência de 100 W para manter acondicionamento das amostras a 25°C e tornar a umidade mais estável, para isso foi utilizado controle liga e desliga por relé de contato simples. Figura 4.13.

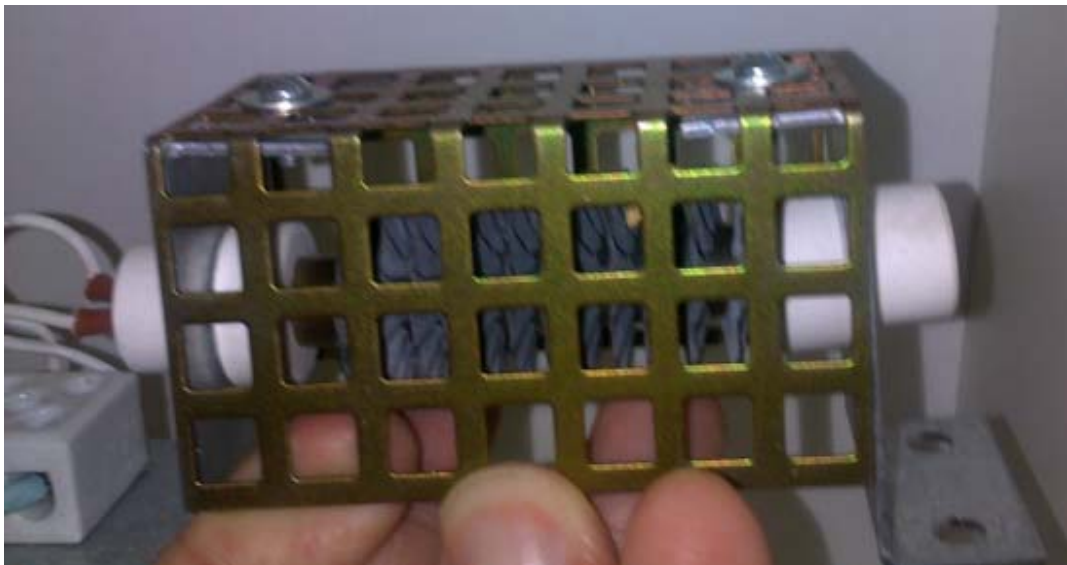


Figura 4.13. Resistência utilizada no acondicionamento das amostras

#### 4.3.3.3 Sensoriamento

Os sensores foram dispostos em pontos estratégicos para monitorar as variações de temperatura. Para os sensores dentro das câmaras, por exemplo, utilizaram-se sensores com maior grau de precisão e preocupou-se em instalá-los de forma que eles não interferissem nas imagens realizadas por termovisor. Foram utilizados nove sensores com instalações dispostas conforme a Figura 4.14.

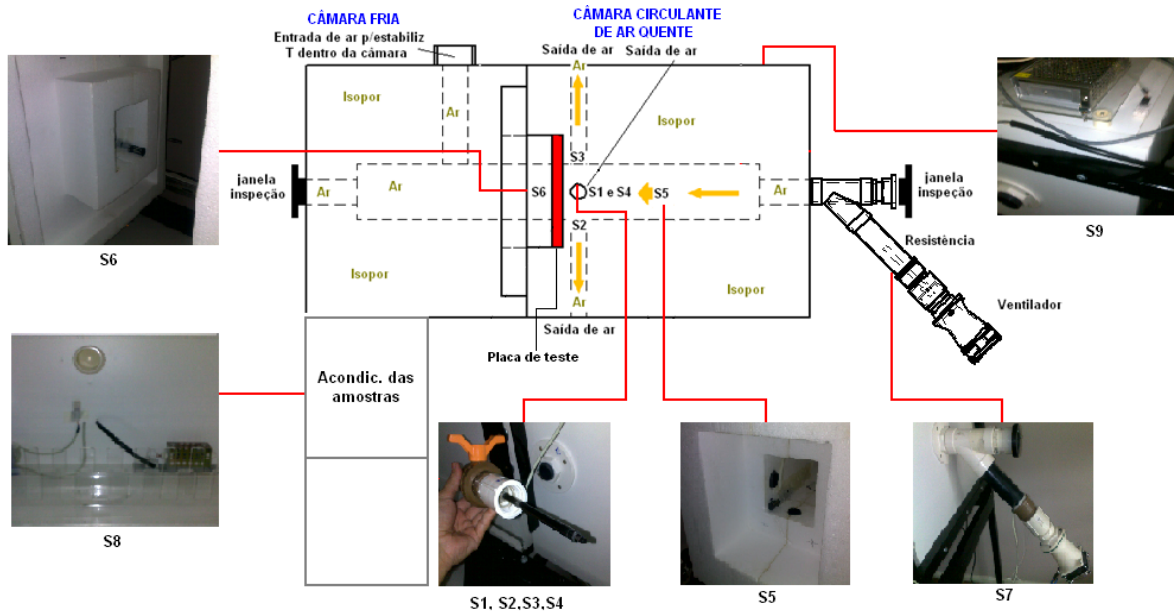


Figura 4.14. Disposição dos sensores na estrutura

Os sensores de saída foram instalados dentro de um tubo de plástico de 5 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento e inseridos em um suporte de acrílico em que foram centralizados e colocados dentro de uma conexão de PVC para depois serem posicionados nas quatro tubulações de saída (S1,S2,S3,S4).

Na Figura 4.14 observam-se também sensores DHT 22 (S8) no acondicionamento das amostras e outro na parte superior da caixa (S9), para as variáveis de temperatura e umidade ambiente.

O modo de segurança foi utilizado um sensor LM 35 (S7), quase em contato com a resistência para monitorar o aquecimento do duto de PVC. O Quadro 4.1 sintetiza a localização, tipo e precisão de aferições de temperatura e umidade.

Quadro 4.1. Características dos sensores utilizados

Sensor		Precisão % °C	Precisão % UR	Localização
S 1, S2, S3 e S4	LM 35	+0,5	-	Saídas de ar
S7	LM 35	+0,5	-	Na resistência
S5	Higroclip	+0,3	+1	Câmara circulante
S6	Higroclip	+0,3	+1	Câmara vedada
S8	DHT 22	+0,5	+2	Amostras
S9	DHT 22	+0,5	+2	Ambiente

#### 4.3.3.4 Controle de velocidade e temperatura

Para controle da temperatura da câmara circulante de ar quente, utilizou-se chaveamento modulado por PWM, com relé de estado sólido controlado por ângulo de fase, implementado com lógica PID de controle e operando em malha fechada, alcançando variações de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  de temperatura. Devido ao elevado aumento da temperatura da resistência acondicionada na tubulação de PVC e às condições do ponto de fusão do poliestireno e da espuma de poliuretano, por medida de segurança, optou-se em trabalhar com a temperatura máxima de  $45^{\circ}\text{C}$ . Com ambiente externo controlado a  $18^{\circ}\text{C}$  por ar condicionado, pôde-se proporcionar uma diferença em torno de  $20^{\circ}\text{C}$  entre as duas temperaturas das superfícies, assemelhando-se às normas NBR 12094 e NBR 15220-4 quanto a isso.

O controle de velocidade do motor gerador de ar forçado através de uma turbina foi realizado por sinal PPM, utilizando-se uma saída digital do micro controlador, o sinal foi modulado para controle concatenado das três bobinas do motor através de dispositivo eletrônico (ESC), responsável por controlar a passagem de corrente para o motor, composto por seis transistores de acionamento. Por fim foi elaborado um controle liga e desliga em malha fechada para o acondicionamento das amostras através de relé de contato simples. O diagrama de blocos da Figura 4.15, sintetiza todo o sistema de controle.

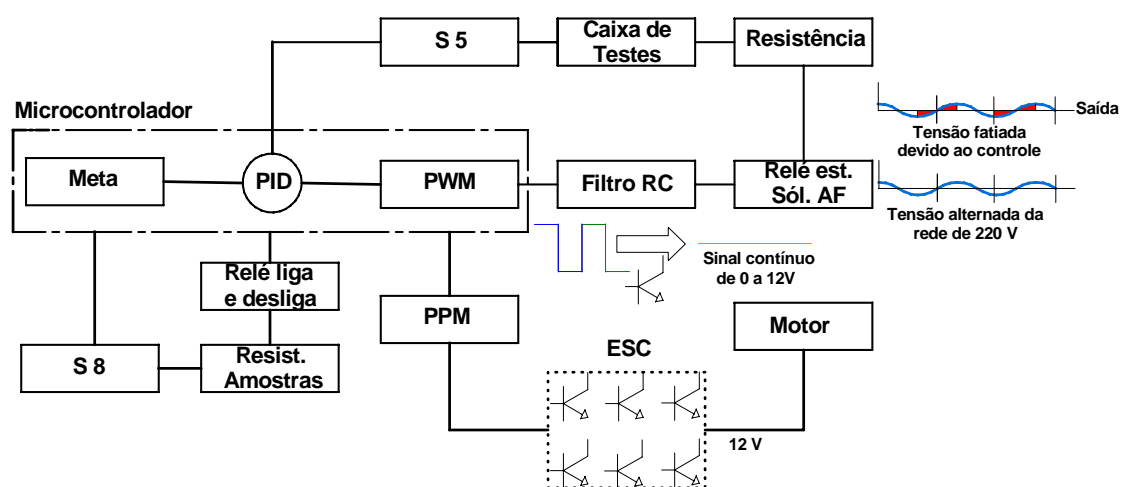


Figura 4.15. Diagrama de blocos explicativo do funcionamento de controle de resistência e motor

A temperatura de entrada, escolhida como meta para controle, foi implementada por equação proporcional integral, gerando um sinal PWM de onda quadrada, com variação da largura das cristas e picos de 0 e 5 V, amplificando sinal ao passar por um transistor TIP 122 de 0 a 12 V, que depois de ser filtrada para estado contínuo, entre 0 a 12 V, passa a ter o chaveamento pelo controle do relé de estado sólido, com controle de ângulo de fase, proporcionalmente à lógica de controle implementada, que fatiaria a tensão alternada de 220 V para alimentar na proporção correta à resistência.

O controle liga e desliga foi implementado para as amostras em malha fechada com lógica se maior que 25°C desliga, caso contrário liga.

#### 4.3.3.5 Aquisição das curvas de velocidade

A turbina utilizada foi da marca EDF com motor de consumo de 39 A, 945 g de empuxo e potência de 491,4W a 12 volts, a qual foi adaptada numa peça confeccionada em impressora 3 D e flange de PVC com rosca para adaptar à resistência. O motor, com ausência de escovas, utilizado para aeromodelos, possui característica de manter rotação constante, o que, durante os experimentos, garantiu velocidades de entrada por períodos de até oito horas intermitentes ajustadas. Foi adquirida uma fonte de 30 A de 12 V e o motor foi utilizado com 50% de sua potência, dando garantia para operar por longos períodos do experimento, Figura 4.16 (a) e (b).



Figura 4.16. Peças para adaptação da turbina

Nos experimentos preliminares percebeu-se que a resistência aquecia muito, correndo o risco de causar algum acidente. Em vista disso, foi desenvolvido um

estudo para desenvolvimento do controle separadamente. Para isso confeccionou-se uma caixa em MDF, simulando as mesmas condições de volume, entrada e saída de ar da câmara de ar quente circulante. Figura 4.17.



Figura 4.17. Protótipo de desenvolvimento de eletrônica e controle de temperatura e velocidade do ar, com as mesmas condições de volume de ar da câmara da estrutura para experimentos.

O mesmo volume de ar contido na estrutura, confeccionada em MDF, foi o mesmo que o da câmara circulante de ar quente da estrutura para o experimento. Essa estrutura, além de ser usada para estudo do controle, foi também utilizada para aquisição das curvas de velocidade. Utilizando dois tubos de Pitot, com micro manômetros digitais, localizados na saída do jato e aproximadamente a 70 mm da placa em estudo, realizaram-se as medições das velocidades médias em cinco pontos, primeiramente, a temperatura ambiente e após a 45°C simulando a condição de temperatura na câmara circulante de ar quente. Figura 4.18 (a). A primeira leitura de velocidade foi realizada na parte central e as outras duas acima e abaixo dessa posição, sendo: (-2,-1,0,1 e 2). Em cada ponto de leitura aferiu-se a velocidade para

20 posições de controle. Os micro-manômetros digitais registraram a velocidade para cada ponto. Figura 4.18(b).

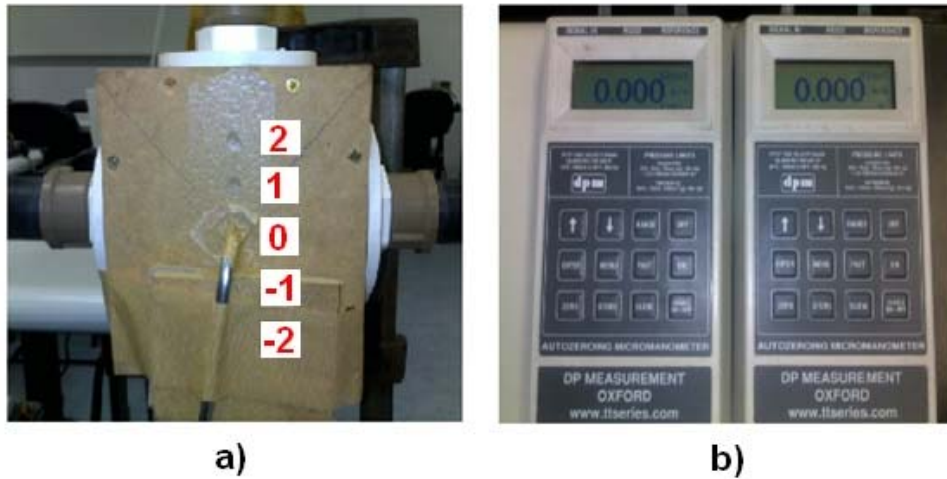


Figura 4.18. Posições de medida de velocidades com tubo de Pitot e manômetros digitais.

#### 4.4 Procedimentos experimentais

As amostras foram acondicionadas em temperatura controlada de 25°C e aferiu-se densidade e umidade delas, mesmas antes e depois de serem acondicionadas. Os experimentos foram implementados com temperatura fixa de 45°C, variando-se a velocidade de entrada de ar em cinco valores, sendo que a primeira velocidade foi a de espera, até atingir regime estacionário, e as demais velocidades foram aumentadas progressivamente de 30 em 30 minutos, sendo que entre esses períodos cada face da placa analisada era fotografada por termovisor, e que posteriormente essas imagens eram avaliadas pelo software do aparelho para obtenção das temperaturas médias com matriz de 19200 pontos.

Os dados armazenados pelo programa, com aquisição a cada segundo totalizaram ao final de quatro horas de teste 14.400 registros, sendo assim, a partir do estado permanente realizou-se a média de todas as medidas, compactando em cinco pontos. Os arquivos gerados pelo software supervisorío com as variáveis medidas, armazenadas e controladas pelo software foram abertos numa planilha eletrônica em que foram calculadas as médias para cada intervalo de 30 minutos e acrescentadas as médias das temperaturas superficiais, coletadas por um termovisor, com o mesmo intervalo. Finalmente com essa mesma planilha eletrônica

pôde-se calcular as variáveis do estudo, Quadro 4.2. O processo automatizado dos experimentos com acompanhamento em tempo real e geração de relatórios de ensaios garantiu praticidade e velocidade nas análises.

Quadro 4.2. Variáveis medidas armazenadas e calculadas no uso do dispositivo

Medido e Armazenado	Calculado/Planilha	Controlado
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temp. e umid. câm. quente;</li> <li>• Temp. e umid. da câm. fria;</li> <li>• Temp. e umidade ambiente;</li> <li>• Temp. nas quatro saídas de ar;</li> <li>• Temp. e umidade das amostras;</li> <li>• Temp. nas sup. das amostras.</li> <li>• Velocidade de teste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calor por condução;</li> <li>• C.transf calor convecção;</li> <li>• N° de Reynolds médio;</li> <li>• N° de Nusselt.médio</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temp. de teste;</li> <li>• Velocidade de teste.</li> </ul>

#### 4.4.1 Medidas de densidade e umidade das amostras

As amostras foram acondicionadas com temperatura controlada de 25°C e estabilizou-se em umidade de 53% a 57%. Todas as amostras foram pesadas com balança digital de resolução de 0,01g, antes do acondicionamento e depois do acondicionamento. Figura 4.19.

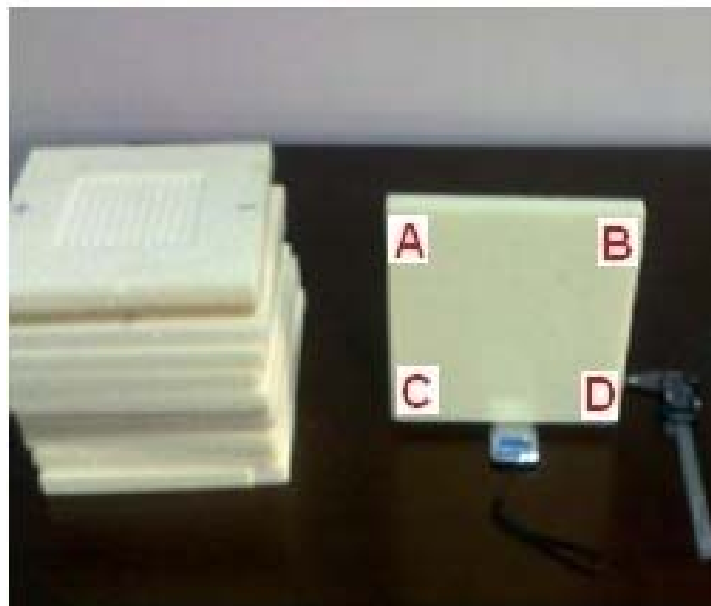


Figura 4.19. Aferição de massa e espessura das amostras

As medidas realizadas depois do acondicionamento foram subtraídas das medidas realizadas antes do acondicionamento para observar presença de umidade em cada placa.

Além das medições de massa foram realizadas medições nas dimensões de espessura nos quatro vértices da placa, marcados como A, B, C e D da Figura 4.19 e realizados com paquímetro antes do ensaio e depois do ensaio, para observar alguma possível deformação devido ao aperto entre as câmaras.

#### **4.4.2 Análise das amostras submetidas ao experimento**

A amostra, após pesada, retornou para acondicionamento, por mais um período de 48h, para depois ser pesada novamente e analisada dentro da câmara. Após ser retirada da caixa de acondicionamento, ela foi posicionada dentro da cavidade da câmara circulante com suas geometrias no sentido vertical.

Todos os experimentos foram realizados em ambiente com temperatura controlada a 18°C, com ar condicionado e umidade monitorada. Considerou-se troca de calor para todos os experimentos, como sendo unidimensional e testado sob temperatura e velocidade considerada constante. Todas as amostras testadas foram ajustadas com o mesmo aperto com limitador mecânico, garantindo um aperto padrão para todas as amostras, Figura 4.9 (c).

Foi também colocado um espaçador de EVA de 1,5 mm de espessura, para garantir o aperto e para verificar se o aperto estava sendo realizado com sucesso. Figura 4.20.





Figura 4.20. Espaçador de espuma de EVA

Fixando-se, portanto, temperatura e velocidade da entrada de ar forçado para o sistema, de modo que não variassem, após atingido o estado estacionário os experimentos foram monitorados e efetuados.

#### **4.4.3 Medições de temperatura com termovisor**

Para as análises das imagens termográficas foi usado o termovisor da marca FLUKE Ti 35, com possibilidade de analisar 19200 pontos, precisão de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  e resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Para ajustar a emissividade do aparelho de acordo com a superfície do material a ser medida, utilizou-se uma fita preta para isolamento de eletricidade que foi colada na superfície da placa. Após a colagem da fita, foi estabelecido um tempo para regularizar a temperatura desta, com a superfície da placa, e, em seguida, aferiu-se a temperatura sobre a superfície da fita. Como a temperatura da fita pode ser considerada a mesma da placa tendo-se os dois corpos em contato e sabendo-se que a emissividade de uma superfície negra é aproximadamente igual a 1, ajustou-se para essa temperatura medida na superfície da amostra de poliuretano a emissividade correspondente. A emissividade do termovisor estava regulada em 0,98, ao aferir-se a temperatura no corpo negro (fita) e foi observado que não houve alteração de temperatura para mesma emissividade sobre a superfície da chapa de

poliuretano, indicando que a emissividade de 0,98 poderia ser usada para as medições

Ajustada a emissividade foram capturadas as imagens termográficas através das janelas de inspeção situadas na câmara de ar frio e na câmara de ar quente circulante, respectivamente, a e b da Figura 4.21.



Figura 4.21. Janela de inspeção para termovisor para câmara fria e câmara circulante de ar quente

As análises foram realizadas pelo software INSIDE IR 4.0 do equipamento, através do qual pode-se inspecionar 19200 pontos de temperatura sobre a imagem, analisando com precisão a temperatura sobre as cristas e vales das superfícies rugosa. Foi possível, também, determinar a temperatura média, utilizando sistema de coordenadas x e y e estabelecendo uma área padrão para análise em todas as placas, Figura 4.22.

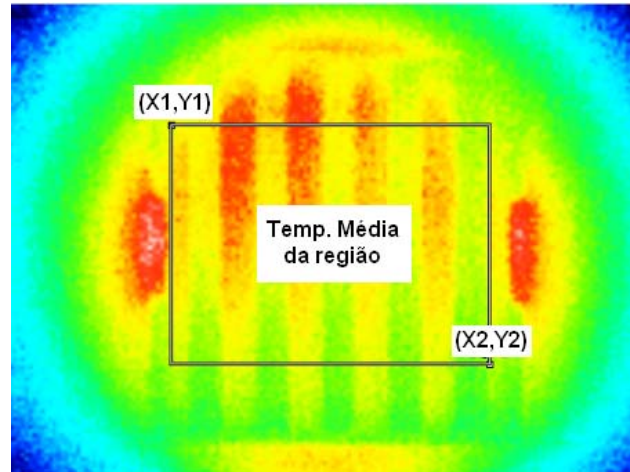


Figura 4.22. Área de inspeção para obter temperatura média com software INSIDE IR do termovisor

#### 4.4.4 Medida de potência e taxa de perda de calor na superfície da placa

A potência fornecida à câmara circulante de ar quente, para manter a temperatura constante, foi monitorada e armazenada pelo software supervisor, mas aconteceram fugas, além das que ocorreram pelos dutos de saídas de ar que não foram estimados. Essas fugas possivelmente ocorreram na estrutura “Y” de PVC de entrada onde estava acondicionada a resistência Figura 4.12. Em virtude disso, a média final desses valores, a partir do regime permanente, foi utilizada como sendo o calor que atinge a placa pelo lado da câmara circulante com as devidas perdas pelas quatro saídas, somando-se essas fugas. Para determinar o calor que atinge a superfície da placa pelo lado da câmara circulante com as perdas pelos escoamentos de saída, considerou-se a expressão da Equação 4.1.

$$Q_{\text{resistência}} = Q_{\text{atinge a placa}} + Q_{\text{saída}} + \text{Fugas} \quad (4.1)$$

O calor que atinge a superfície da placa pelo lado da câmara de ar quente pode ser considerado o mesmo de saída, ou seja, que é transmitido através da placa considerando-se condução unidimensional. Tem-se a igualdade segundo a Equação 4.2.

$$Q \text{ condução} = Q \text{ atinge a placa} \quad (4.2)$$

Calculando-se o calor que deixa a placa pelo lado da câmara fria tem-se o calor que atinge a placa pelo lado da câmara circulante de ar quente que é transferido por convecção. Para determinar o calor de condução utilizou-se a expressão da lei de Fourier, dada pela Equação 3.1.

Sendo o valor de K o coeficiente de condutividade térmica do poliuretano  $K=0,026 \text{ W/m.K}$  (CENGEL, 2012),  $T_1$  e  $T_2$  as temperaturas adquiridas como uso da temperatura média da superfície, utilizando-se o termovisor através da janela de inspeção da câmara circulante de ar quente e da câmara circulante de ar frio respectivamente. A área a considerar na expressão é sempre a área de saída do calor que é a área da superfície plana  $110 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$ .

A espessura considerada foi determinada como sendo equivalente à espessura de  $19 \text{ mm}$  da placa plana. Com o uso do software Solid Edge, obtiveram-se as áreas dos perfis de espessura para de placa. Desse modo, calculou-se em cada perfil qual era o retângulo de área conhecida com as dimensões  $110 \text{ mm}$  e com altura 'X' (linha pontilhada) que tinha essa mesma área. A Figura 4.23 ilustra a explicação para a placa frisada.

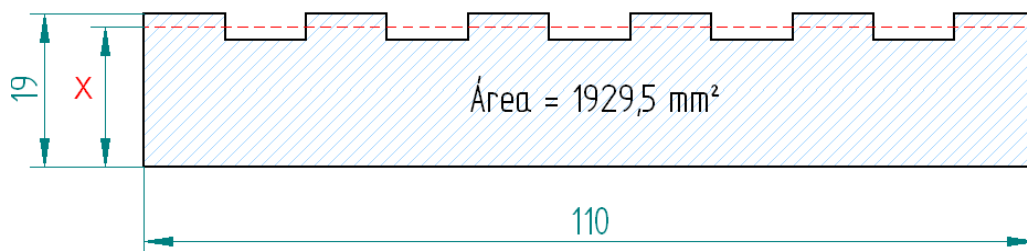


Figura 4.23. Perfil de placa frisada com equivalência em perfil retangular

Com área de  $1929,5 \text{ mm}^2$  o retângulo equivalente de comprimento  $110$  com altura X é o retângulo  $110 \text{ mm} \times 17,54$  de altura. Dessa forma obtiveram-se as espessuras equivalentes para todas as placas segundo a Tabela 4.2

Tabela 4.2. Área da face lateral do perfil geométrico e sua espessura equivalente

Placa	Área da face lateral (mm <sup>2</sup> )	Espessura equivalente (mm)
Ondulada Baixo	1978	17,98
Triangular	1924	17,50
Telhado	1924	17,50
Frisada	1929,5	17,54
Ondulada Cima	1799	16,35

Com todas as incógnitas definidas encontra-se o valor de Q na saída da superfície plana da placa pelo lado da câmara fria que é o mesmo que atinge a placa no lado da câmara circulante considerando-se as perdas.

#### 4.4.5 Procedimentos e cálculos em convecção

Foram consideradas placas verticais e expostas à convecção forçada por jatos incidentes confinados e desenvolvidos. Estabelecendo-se que a resistência, ao aquecer, emana potência, que pode ser determinada e calculada através do software de monitoramento, e considerando-se que essa potência produzida pela resistência em forma de calor atinja à superfície da placa, poder-se-ia determinar a taxa de calor se não ocorressem fugas.

Como ocorrem fugas pelas saídas superiores, inferiores, laterais e na entrada do sistema, a taxa de calor que atinge à superfície da placa, por convecção forçada, pode ser aproximada, como sendo a taxa de calor calculada por condução com coeficiente de condutividade obtido na literatura, como já comentado anteriormente.

Portanto a taxa (Q) de calor que atinge à placa por convecção é conhecida e a maneira de calcular, já foi apresentada anteriormente. Também são conhecidas as temperaturas médias na superfície da placa ( $T_s$ ) coletada por termovisor e dentro da câmara ( $T_\infty$ ), ambas armazenadas pelo software supervisor. Tem-se de forma direta o cálculo do coeficiente de convecção (h) de acordo com a Equação 3.5. Sabendo-se o valor do coeficiente de convecção (h) pode-se determinar o valor do número adimensional de Nusselt, conforme a Equação 4.3.

$$Nu_x = \frac{h_x \cdot L}{k} \quad (4.3)$$

Onde:

- $Nu_x$  - Número adimensional de Nusselt;
- $h_x$  - Coeficiente de convecção (W/m<sup>2</sup>. K);
- L - Comprimento característico (m);
- k - Condutividade térmica do ar (W/m. K).

O comprimento característico irá fazer diferença quando as geometrias forem colocadas no sentido horizontal, pois haverá maior taxa de calor de convecção, resultando numa maior dificuldade do calor subir, devido à disposição das geometrias no sentido horizontal. O Quadro 4.3 mostra o valor do comprimento característico de cada geometria escolhida quando colocada no sentido horizontal dentro da câmara.

Quadro 4.3. Comprimento característico segundo geometria da placa

<b>Geometria</b>	<b>Placa</b>	<b>Comprimento característico (mm)</b>
<b>Plana</b>	a	110
<b>Triangular</b>	b	155
<b>Ondulada para baixo</b>	c	172,8
<b>Ondulada para cima</b>	d	172,8
<b>Frisada</b>	e	160
<b>Tipo telhado</b>	f	127,5

No presente estudo as placas foram colocadas com as geometrias no sentido vertical, dessa maneira considerou-se que o comprimento característico é igual à de uma placa plana. O número de Nusselt é um parâmetro importante para projetos e está diretamente ligado à escolha das geometrias de superfície que melhor adaptam-se ao processo de transferência de calor em estudo.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma metodologia para estudo de transferência de calor por jatos incidentes foi implementada e concretizou-se em um projeto, com características mecânicas e automatizadas, necessárias a essa finalidade. Procedeu-se, então, a observação e avaliação dessas características, com o aparato completo em funcionamento com experimentos práticos para validação da proposta.

Os experimentos foram realizados com simulação em regime permanente, considerando transferência de calor por convecção forçada e condução. A resistência foi ajustada de modo que a temperatura da câmara circulante de ar quente permanecesse constante. O controle dessa temperatura foi determinado pela potência da resistência e o valor escolhido para o teste foi 45°C.

Após atingir o regime permanente efetuaram-se as aferições das temperaturas superficiais com termovisor nas seis placas de estudo. Com a coleta dos resultados, foi possível analisar, utilizando-se de uma planilha eletrônica, as médias de umidade e temperatura de todo sistema. Realizaram-se também aferições de massa e medidas de espessura antes e depois do acondicionamento. Foi possível determinar as correlações entre número de Nusselt e de Reynolds para placa plana e relacionar com a literatura para validação do equipamento proposto. Observou-se o coeficiente de transferência de calor, por convecção, associados aos diferentes corrugamentos produzidos nas superfícies da placa. O calor transmitido por convecção devido ao jato foi quantificado a partir do calor conduzido através da placa de poliuretano para cada corrugamento.

As correlações do número de Nusselt e Reynolds, para as demais geometrias sem ser a plana, foram estipuladas expressando uma proporcionalidade entre  $Nu$  e  $Re$  com expoente de  $Re$  diferente de 0,5, indicando a dependência do expoente não somente relacionado à proporção  $H/D$ ,  $X/D$  e  $Pr$  como aponta a literatura referenciada no item 3.10.3, mas também vinculado ao corrugamento produzido na superfície da placa.

## 5.1 Projeto final e características gerais

A estrutura, após várias e cuidadosas etapas de construção e com implementação do projeto mecânico, eletrônico e supervisor, constituiu uma ferramenta automatizada completa para realização de experimentos laboratoriais para estudos de transferência de calor na avaliação de rugosidades superficiais com amostras preparadas em câmara de acondicionamento.

Os experimentos demonstraram que o isolamento entre as duas câmaras foi suficiente para que não ocorressem fugas de calor nos encaixes. A espuma rígida deu flexibilidade para a fabricação de rugosidades superficiais com formatos diferenciados, oferecendo baixo custo e facilidades na usinagem.

A metodologia foi validada para uma placa plana com resultados semelhantes encontrados na literatura do item 3.10.3, conforme veremos a seguir. As Figuras 5.1 a e b mostram o equipamento completo e com as configurações de uso.

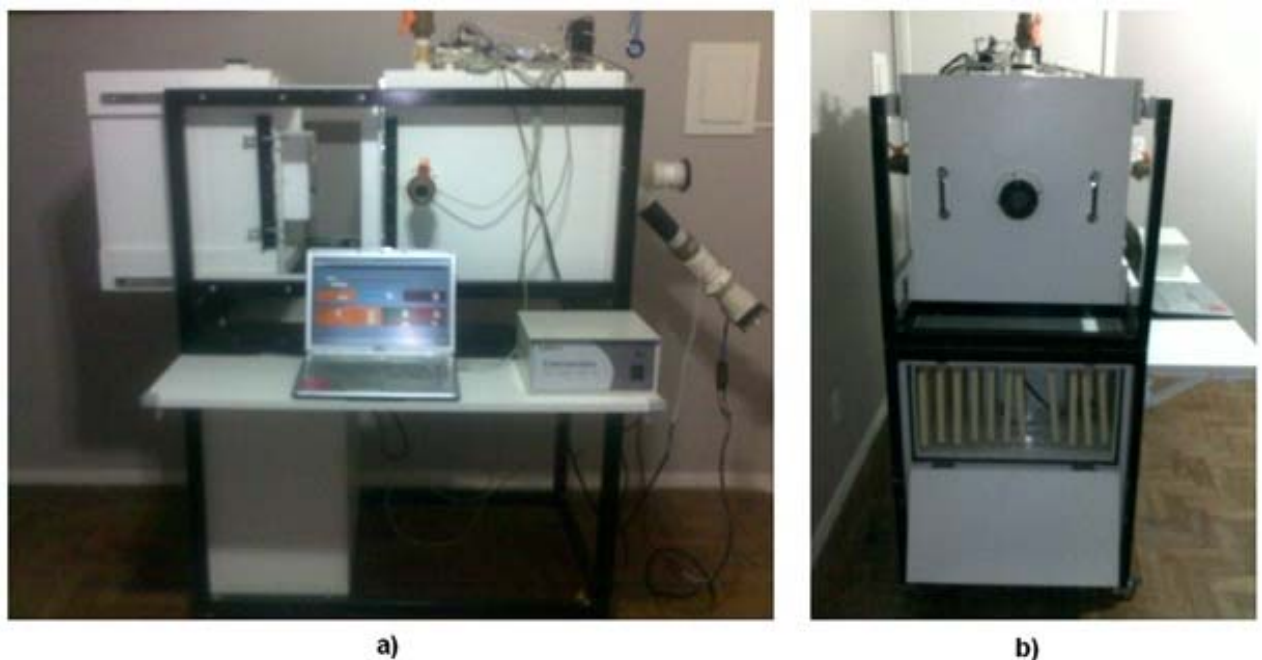


Figura 5.1. Estrutura completa em modo de funcionamento de teste.

A disposição das medidas das duas câmaras bem como distanciamento entre bocal e placa com relação  $H/D = 7,7$ ; admissões e saídas de ar e locais de



inspeção de imagens com termovisor e placa, podem ser observadas na esquematização da Figura 5.2.

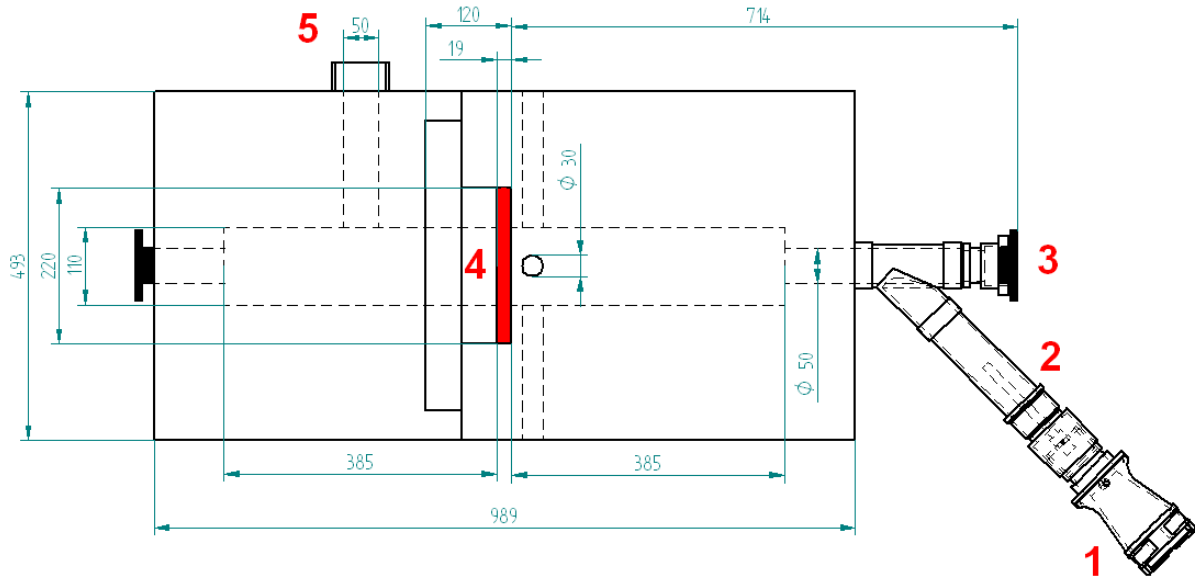


Figura 5.2. Principais dimensões das duas câmaras fechadas: 1- Acondicionamento da turbina, 2- Acondicionamento da resistência, 3- Janela de inspeção, 4- Placa de teste, 5- Admissão de ar frio de ambiente refrigerado com ar condicionado

Sintetizando as características da estrutura automatizada, podemos citar:

- Armazenamento de 14.400 pontos por software supervisor para nove valores de sensoriamento;
- Determinação do coeficiente de convecção;
- Análises gráficas de quantidade de calor transmitida através da placa em velocidades diferentes em função dos corrugamentos;
- Análises gráficas do coeficiente de convecção em velocidades diferentes, como função dos corrugamentos;
- Acondicionamento de amostras com temperatura controlada;
- Possibilidade de adquirir temperatura média adequada das superfícies das placas com uso de termovisor, com grande quantidade de pontos medidos;
- Dispensa posicionar sensores nas superfícies das placas de estudo para obtenção das medidas de temperatura. A presença de grande quantidade

de sensores pode afetar os experimentos, interferindo com maior acúmulo de energia térmica que pode distorcer os resultados;

- h) Estudo e conhecimento de superfícies para projetos que visem maior ou menor transferência de calor;
- i) Possibilidade de longos períodos para realização dos experimentos;
- j) Adaptação para o estudo de outras configurações de jatos incidentes, podendo distanciar bocal da placa e variar formatos de bocais;
- k) Fechamento adequado entre as câmaras com passagem de calor através da placa somente pela área de inspeção, o que garante que o calor transmitido possa ser considerado na direção unidimensional;
- l) Amostra com 75 % de área de moldura com vedação no fechamento entre as câmaras e com 25% para área de inspeção, condicionando, como no item anterior, a suposição de transmissão de calor unidimensional através da placa.

Pela facilidade de usinagem do poliuretano e pelas características apresentadas da estrutura automatizada apresentadas, podem-se estimar condições de transferência de calor por convecção forçada em outros materiais, através do uso da espuma rígida de poliuretano, auxiliando em projetos, os quais deseja-se maximizar ou minimizar a troca de calor por convecção forçada em função dos corrugamentos superficiais.

### **5.1.1 Fechamento das câmaras**

O fechamento entre as câmaras, considerando as paredes de isopor, ficou ajustado e com deslizamento suave da câmara fria sobre os quatro trilhos na base, não houve desencontro dos encaixes, bem como aparecimento de frestas que permitissem a saída de calor no contato entre as duas câmaras, pois durante os experimentos o fechamento entre as câmaras foi realizado com aperto de parafusos laterais como comentado anteriormente no item 4.3.2.

Foi avaliado através do software do termovisor que, após quatro horas do início do experimento, as linhas de encaixes das duas câmaras, pela parte externa da estrutura, apresentaram pequenas variações de temperatura, apenas devido às variações do controle de temperatura do ar condicionado, mas não de fugas de calor, Figura 5.3.

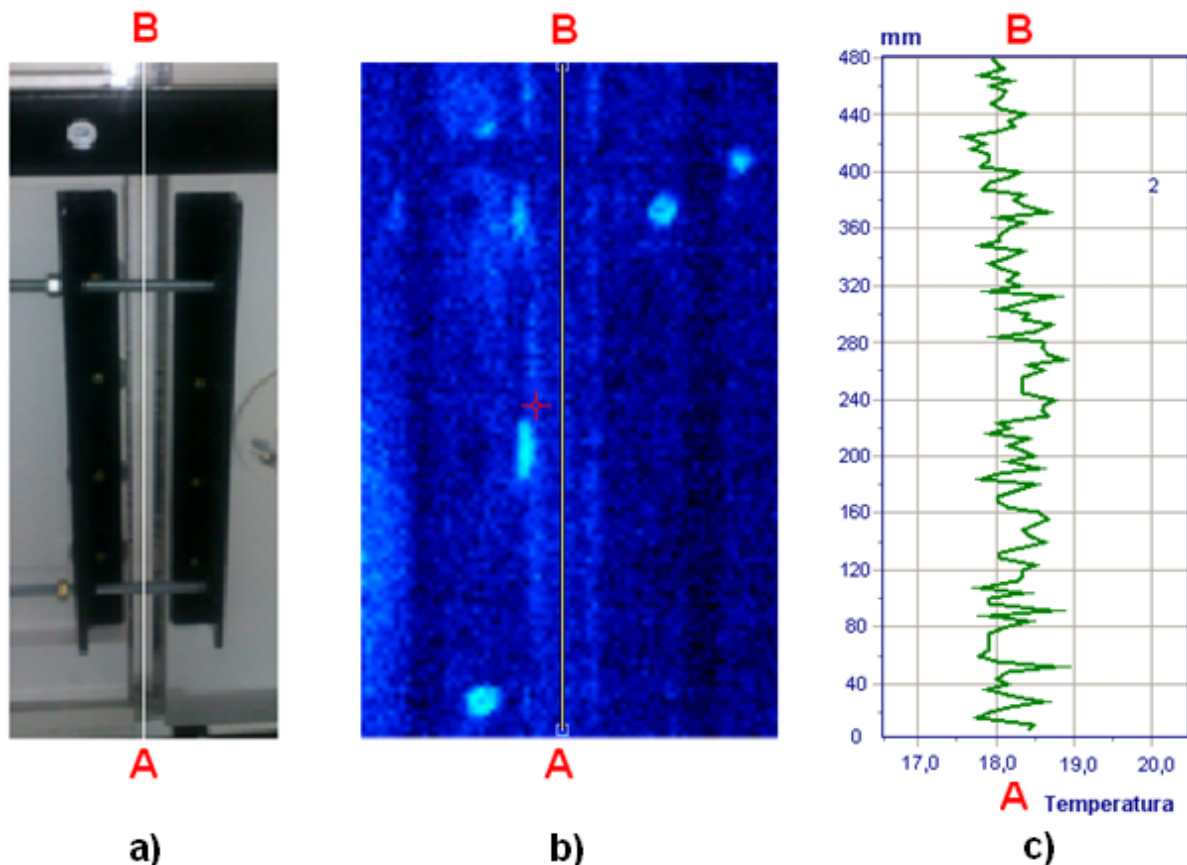


Figura 5.3. Análise da variação de temperatura no encaixe entre as câmaras, vistas no segmento A-B. Onde: a) Segmento A-B em que foi retirada imagem termográfica; b) Segmento A-B com imagem termográfica ; c) Segmento A-B com oscilações de temperatura devido ao controle de ar condicionado.

A fabricação das câmaras com o processo de usinagem do poliestireno, através de máquina de usinagem CNC, garantiu encaixes adequados nos blocos que foram montados, colados e depois envolvidos por duas películas termo retráteis como comentado no item 4.3.1. As dimensões foram exatas e as amostras encaixaram perfeitamente na cavidade da câmara quente, como vemos na Figura 4.9 (a) e (b), sendo que ela também possuía fechamento ajustado com a câmara fria, o que foi percebido pelo atrito das paredes de poliestireno no fechamento das câmaras. Para garantir, ainda mais vedação de calor entre as duas câmaras, optou-se por adicionar um espaçador de EVA no conjunto. Observou-se, após os primeiros experimentos, marcas dos encaixes dos blocos de isopor estampadas no espaçador de EVA, evidenciando um fechamento devidamente pressionado pelas duas câmaras. Figura 5.4.

O poliestireno (isopor) não apresentou características visíveis de deformação devido ao aperto dos quatro parafusos nas duas laterais, pois havia

área de contato suficiente entre as câmaras para não haver deformação. Os experimentos foram realizados através de simulação de convecção forçada e condução, e os efeitos da radiação foram desconsiderados. Dessa forma, a vedação adequada para os experimentos entre as câmaras, foi alcançada e a consideração de que a transmissão do calor, através da placa, fosse unidimensional foi possível.



Figura 5.4. Espaçador de EVA mostrando marca da compressão entre as câmaras

Apesar de, popularmente, o poliestireno ser considerado um material frágil, ele pode apresentar boa resistência a esforços mais elevados de compressão mais elevadas e isso irá depender da área de contato e da densidade dele. O isopor utilizado possui densidade de  $20 \text{ kg/m}^3$ , esse isopor com uma carga de  $0,5 \text{ kg/cm}^2$  deformaria menos que 1 % sob esforço de compressão (TORREIRA, 1980).

Na retirada das amostras com tubo de PVC, com borracha siliconada na extremidade do tubo não ocorreu nenhuma deformação, pois a folga de apenas 1mm entre o diâmetro do tubo de PVC e o tubo fez com que o tubo não inclinasse quando o mesmo deslocou-se de forma ajustada, pelo orifício de entrada de PVC da janela de inspeção, proporcionando a retirada da placa de teste, sem inclinar dentro do compartimento da câmara circulante, Figura 4.9 (d).

### 5.1.2 Curvas das velocidades utilizadas

Os resultados da aquisição das curvas de velocidade a 45°C, com média de 20 pontos, para cada uma das alturas dos cinco pontos de medição com tubo de Pitot estão mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Velocidade na saída do bocal a 70 mm da superfície da placa

Controle	Placa	Bocal
	V (médio) (m/s)	V (médio) (m/s)
57	0,71	7,37
58	0,84	7,84
59	0,85	8,24
60	0,96	8,62
61	0,92	8,95
62	0,97	9,30
63	1,03	9,64
64	1,04	9,92
65	1,08	10,20
66	1,12	10,46
67	1,24	10,82
68	1,31	11,10
69	1,11	11,38
70	1,13	11,58
71	1,32	11,84
72	1,09	12,02
73	1,21	12,28
74	1,12	12,50
75	1,38	12,66

Foram adquiridos os valores de velocidade na placa e no bocal, para as cinco alturas, e após traçou-se a curva do perfil de velocidade média de cada ponto em função da altura medida. Observou-se que a velocidade nas regiões mais afastadas do centro eram maiores, Figura 5.5.

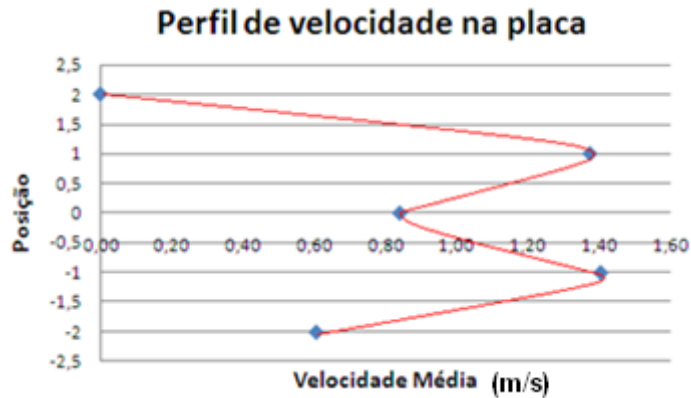


Figura 5.5. Perfil de velocidade média a 70 mm da placa

Considerando o esquema da Figura 4.15 existe um bloco chamado de Esc que é um dispositivo eletrônico composto internamente por transistores. Esse dispositivo é configurado para trabalhar com valores de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , para controle digital com modulação de pulsos, podendo o mesmo ser utilizado para controlar a velocidade de mais de um tipo de motor. No caso do motor utilizado, o início da rotação, com velocidade mínima, foi observado estar com valor de  $57^\circ$ , devendo ser esse, portanto, o valor de controle inicial. A partir disso, configurou-se o valor máximo de velocidade de utilização que ficou estabelecido em  $75^\circ$  ou seja, trabalhando com menos que 50 % de sua capacidade, pois o motor ficaria ativo por um período de quatro horas.

### 5.1.3 Controle de temperatura

O intervalo das velocidades escolhidas teve limitações quanto à mínima e a máxima velocidade. Abaixo da velocidade de 7,37 m/s no bocal, o motor não tinha controle, pois essa era a mínima velocidade possível, ou seja, com controle de  $57^\circ$ , como explicado no item anterior. Acima da velocidade de 12,38 m/s ( $75^\circ$ ) a resistência de 600 W não possuía capacidade de controle para manter aquecido, a  $45^\circ\text{C}$  a estrutura da câmara de ar quente circulante. Com essas condições, escolheram-se, dentre os valores de velocidades médias do intervalo, cinco velocidades com espaçamentos suficientes para observar as variações do coeficiente convectivo nas superfícies das placas. Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Velocidades médias escolhidas para os experimentos

V.Placa (m/s)	V.Bocal (m/s)
0,71	7,37
0,92	8,95
1,12	10,20
1,29	11,38
1,31	12,28

A temperatura escolhida para os experimentos foi de 45°C, na câmara de ar quente circulante, e a temperatura da câmara fria foi de 18°C, controlada pelo ar condicionado ambiente. Utilizou-se a velocidade de 0,71 m/s para o estabelecimento de uma condição permanente que foi alcançada em 2hs. Após atingir o estado permanente, foram iniciadas as fotografias infravermelhas com termovisor das superfícies das placas, através das janelas de inspeção, intervaladas de 30 em 30 minutos, fotografando a face aquecida e a fria das placas.

O controle de temperatura de ar a 45°C da câmara de ar quente circulante foi ajustado e teve variações de 0,5 °C acima e abaixo da meta, caracterizando, dessa maneira, as mesmas variações estabelecidas pelas normas de NBR 12094 e NBR 15220-4. O tempo para estabilização da temperatura na câmara com circulação de ar quente foi de 8 minutos, enquanto que para estabilização de temperatura do ar na câmara de ar frio foi de, no mínimo 2 horas, Figuras 5.6 e 5.7, respectivamente.

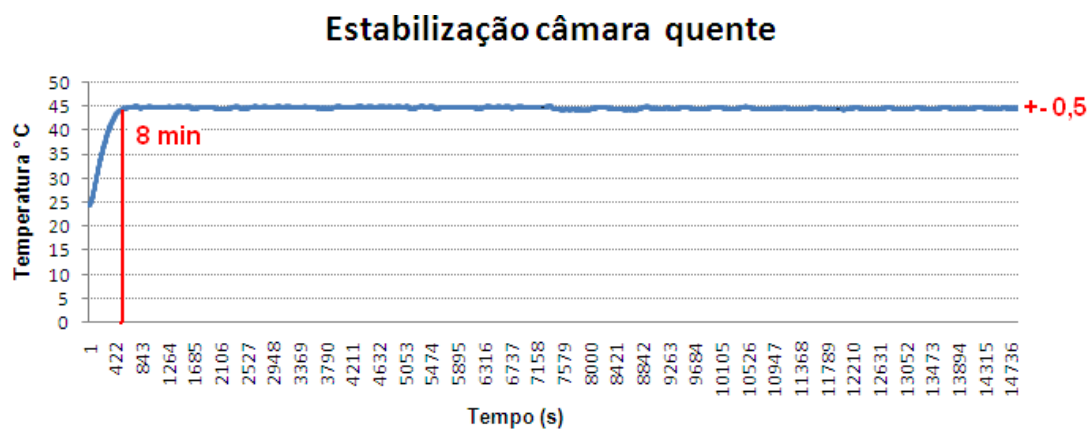


Figura 5.6 Transitório e permanente do controle de temperatura na câmara circular de ar quente.

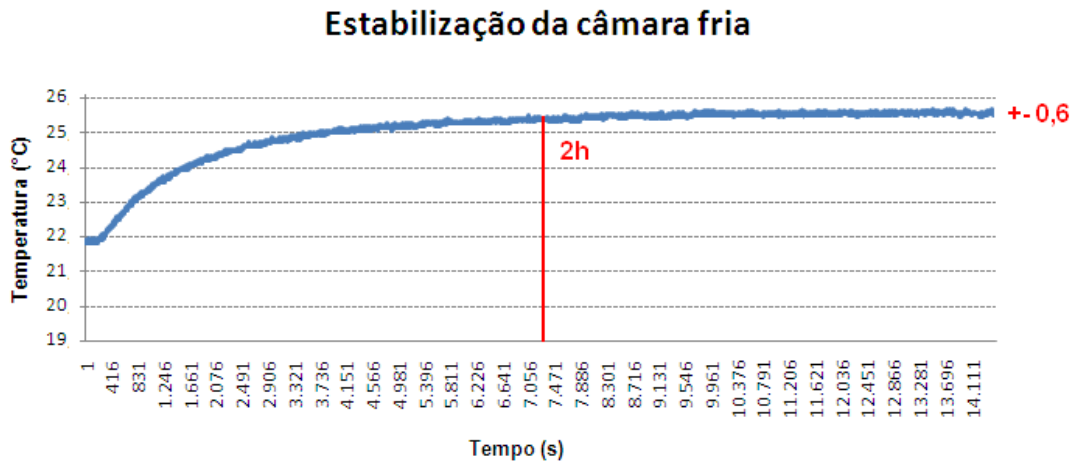


Figura 5.7. Transitório e permanente da estabilização da temperatura na câmara fria.

O controle realizado para acondicionamento das amostras com controle liga-desliga para temperatura de 25°C teve variações de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Além disso, observou-se que a umidade estabilizava-se em torno de  $(55\pm 3)\%$ , proporcionando um acondicionamento adequado das amostras segundo as normas comentadas no item 3.7.1. Lembrando que os experimentos foram realizados a temperatura ambiente de 18°C, por isso podia-se utilizar uma resistência para aquecer até 25°C e acondicionar as amostras da forma correta.

## 5.2 Massa e espessura das amostras

As medidas de massa e espessura das amostras foram realizadas antes de serem colocadas no compartimento de acondicionamento, resultando nos valores mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Aferições de massa e espessura antes do acondicionamento

Placa	Massa (g)	Ponto A (mm)	Ponto B (mm)	Ponto C (mm)	Ponto D (mm)
Plana 1	32,11	19,09	19,02	18,90	19,28
Plana 2	35,09	19	18,90	19	19,08
Plana 3	36,37	19,24	19,35	18,98	19,09
Ondulada Cima	35,54	19,05	19,07	19,16	19,01
Ondulada Baixo	31,63	19,01	19,03	19,012	19,08
Frisada	34,13	18,81	19,01	19,12	19,06
Triangular	34,73	19,15	19,2	18,95	18,7
Telhado	34,48	19,12	19,02	18,62	19,08



Após as primeiras aferições de massa e espessura, as amostras foram levadas para o acondicionamento, em temperatura de 25°C e umidade (55± 3) %. Após 48 horas no acondicionamento, foram retiradas para ensaio e aferiu-se somente a massa, segunda coluna da Tabela 5.4. Após a primeira bateria de ensaio, aferiram-se a espessura nos quatro vértices A, B, C e D, apresentados na Figura 4.19, a partir da terceira coluna.

Tabela 5.4. Aferições de massa após acondicionamento e espessura após o teste

Placa	Massa (g)	Ponto A (mm)	Ponto B (mm)	Ponto C (mm)	Ponto D (mm)
Plana 1	31,78	18,91	18,87	19,04	19,06
Plana 2	34,89	19	18,83	19,03	19,01
Plana 3	36,16	19,3	19,4	18,93	18,95
Ondulada Cima	34,36	19,08	19,06	19,13	19,02
Ondulada Baixo	31,39	19	19,06	19,14	19,06
Frisada	34,03	18,8	18,92	19,05	19,04
Triangular	34,4	19,02	19,3	19,07	18,84
Telhado	34,29	19,16	19,03	19,13	19,06

Procedeu-se, após a segunda medição, com a subtração dos valores da Tabela 5.4 e da Tabela 5.3, resultando na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Diferenças das variação de massa e dimensões de espessura em quatro pontos

Placa	Massa (g)	Ponto A (mm)	Ponto B (mm)	Ponto C (mm)	Ponto D (mm)
Plana 1	0,33	0,18	0,15	-0,14	0,22
Plana 2	.20,2	0	0,07	-0,03	0,07
Plana 3	0,21	-0,06	-0,05	0,05	0,14
Ondulada Cima	1,18	-0,03	0,01	0,03	-0,01
Ondulada Baixo	0,24	0,01	-0,03	-0,128	0,02
Frisada	0,1	0,01	0,09	0,07	0,02
Triangular	0,33	0,13	-0,1	-0,12	-0,14
Telhado	0,19	-0,04	-0,01	-0,51	0,02

Observou-se que a massa de todas as amostras, após acondicionamento e antes de seguir para ensaio, apresentaram valores diferenciados de massa, como pode ser visto na segunda coluna da Tabela 5.3, concluindo que as amostras deveriam ficar sobre acondicionamento térmico com a umidade estabilizada

estabelecendo assim a padronização dos experimentos para todas as amostras estudadas.

Para as variações das espessuras, após o ensaio, observaram-se variações pouco significativas que podiam estar relacionadas ao posicionamento das ponteiros do paquímetro no momento de aferição, portanto desconsiderou-se qualquer deformação nas amostras.

### **5.3 Correlações entre Nusselt e Reynolds para placa plana**

Foram executados oito experimentos de quatro horas de duração para a placa plana, totalizando 40 horas. Todos os experimentos realizados foram com valor controlado de 45°C na câmara circulante de ar quente e temperatura ambiente da câmara fria controlados por ar condicionado a 18°C. Os primeiros experimentos realizados não expressaram correlações coerentes, pois o comportamento entre Nusselt e Reynolds não era caracterizado com  $R^2$  adequado, pois os intervalos de variações das velocidades foram muito próximos entre uma velocidade e outra, não ficando nítido dessa maneira um comportamento crescente entre Nusselt e Reynolds, característico para uma placa plana com jato confinado.

Prosseguiram-se os experimentos com outros valores de velocidade e observou-se que para a variação de velocidade expressa na segunda coluna da Tabela 5.6 obteve-se coerência na correlação entre Nusselt e Reynolds semelhantes aos referenciados na literatura, apontados no item 3.10.3. Em cinco do total de oito experimentos obtiveram-se correlações significativas entre Nusselt e Reynolds que mostraram  $R^2$  consideráveis. Dos três com  $R^2$  melhor explicados realizaram-se as médias. A Tabela 5.6 mostra os resultados médios para a placa plana, com cálculos relacionados a cada intervalo de 30 minutos, depois da estabilização de duas horas, com entrada em estado estacionário, relacionando velocidades de cada intervalo. As temperaturas coletadas pelo termovisor, sendo:  $T_{fq}$  - temperatura na face aquecida,  $T_{ff}$  - temperatura na face não aquecida e  $T_{cam}$  - temperatura média da câmara de ar quente circulante, obtida pelo software supervisor e cálculos posteriores nas demais colunas, para o coeficiente de convecção ( $h$ ), Reynolds e Nusselt.

Tabela 5.6. Resultado médios de três experimentos para placa plana para cada velocidade

Controle	V (m/s)	Tfq (°C)	Tff (°C)	T cam(°C)	Q (w)	h (w/m².K)	Re	Nu
V1	7,37	38,85	25,2	44,5	0,023	0,33	21.899	1,35
V2	8,95	39,75	25,5	44,7	0,024	0,39	26.594	1,61
V3	10,2	39,95	25,7	44,8	0,024	0,40	30.309	1,64
V4	11,38	39,95	25,8	44,4	0,023	0,44	33.815	1,77
V5	12,28	40,5	25,85	45	0,024	0,45	36.489	1,82

Na observação do valor constante, que multiplica Reynolds no formato  $Nu = K \cdot Re^a$ , encontraram-se valores diferentes para cada tipo de corrugamento, compreendidos no intervalo de  $10^{-3}$  a  $10^{-2}$ . Essa correlação foi estabelecida com temperaturas médias de três experimentos de quatro horas totalizando doze horas, como já comentado. A curva de aproximação para placa plana pode ser vista no gráfico da Figura 5.8.

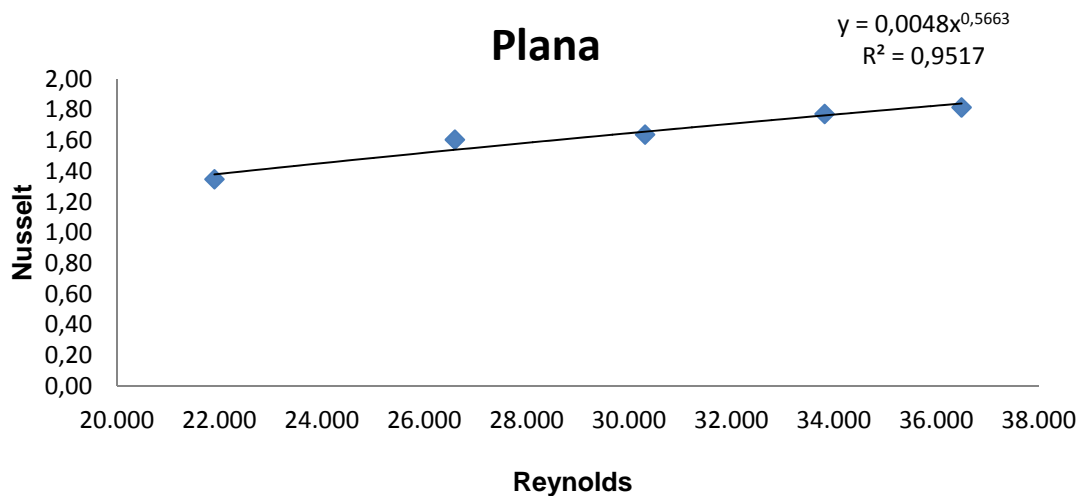


Figura 5.8 Curva da relação entre Nusselt e Reynolds para placa plana

Os valores do expoente, na proporcionalidade entre Nu e Re, observados para o teste da placa plana foram coerentes com resultados encontrados em estudos de jatos confinados por Li e Carimela (2001) com valor de 0,483 e por Lin et al. (1995) com valor de 0,5 para Nusselt médio. Também ficou próximo dos valores encontrados por San et al. (1997) com valor de 0,6375 para Nusselt, local em jatos

confinados e com os encontrados por Lytle e Webb (1994) com valor de 0,53 para Nusselt médio, para jatos não confinados.

Além dos experimentos para obtenção das correlações entre Nusselt e Reynolds para placa plana, os procedimentos adotados, com média de três resultados, foram realizados para os demais corrugamentos superficiais. Realizaram-se mais trinta experimentos para os demais corrugamentos, com duração de quatro horas cada, e investigou-se o expoente de Reynolds na proporcionalidade com Nusselt.

Antes da apresentação dessas correlações, na análise do expoente de Reynolds, na correlação com Nusselt nos demais corrugamentos, foram realizadas as confecções de gráficos do coeficiente de transferência de calor por convecção e quantidade de calor transferida de acordo com as geometrias para cada velocidade considerada. O intuito foi de apresentar as análises que a metodologia poderia proporcionar e de conhecer a variação das variáveis em função da geometria e da velocidade.

#### **5.4 Coeficiente de convecção em função do corrugamento e velocidade**

Foram capturadas as medidas de temperatura com termovisor e, após serem descarregadas no computador e com uso do software do equipamento, coletou-se a temperatura média de cada face da placa. Na sequência procederam-se a confecção dos gráficos relacionados ao coeficiente de convecção em função dos corrugamentos. As placas tipo frisada e tipo telhado não apresentaram dados coerentes e foram descartadas dessa análise. Cada valor apresentado para o coeficiente de convecção, associado a diferentes corrugamentos, para cada velocidade, foi um valor médio de três experimentos consecutivos como comentados anteriormente. O coeficiente de transferência de calor por convecção de cada corrugamento e em cada velocidade do ar aquecido está apresentado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Coeficiente de convecção para cada velocidade e cada corrugamento, com valores de velocidades conforme visto na Tabela 5.2

Geometria	h w/m <sup>2</sup> .k				
	V1	V2	V3	V4	V5
Plana	0,33	0,39	0,40	0,44	0,45
Ond baixo	0,33	0,33	0,36	0,36	0,41
Triangular	0,37	0,39	0,40	0,42	0,47
Ond.cima	0,34	0,38	0,36	0,39	0,41

Considerando que o calor transferido por condução é igual ao calor de convecção, de acordo com o que foi comentado na metodologia no item 4.4.4, e de conhecimento da área superficial de cada geometria, temperatura média da câmara de ar circulante e temperatura da superfície corrugada, medida com termovisor, para cada intervalo, calculou-se o coeficiente de transferência de calor. Os gráficos puderam expressar a influência dos corrugamentos em função do coeficiente de transferência de calor por convecção em cada velocidade, visando avaliar o impacto do corrugamento na transferência de calor. As variações foram confeccionadas graficamente e ocorreram tanto por mudanças nos corrugamentos, quanto pelas mudanças nas velocidades. As Figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam os resultados.

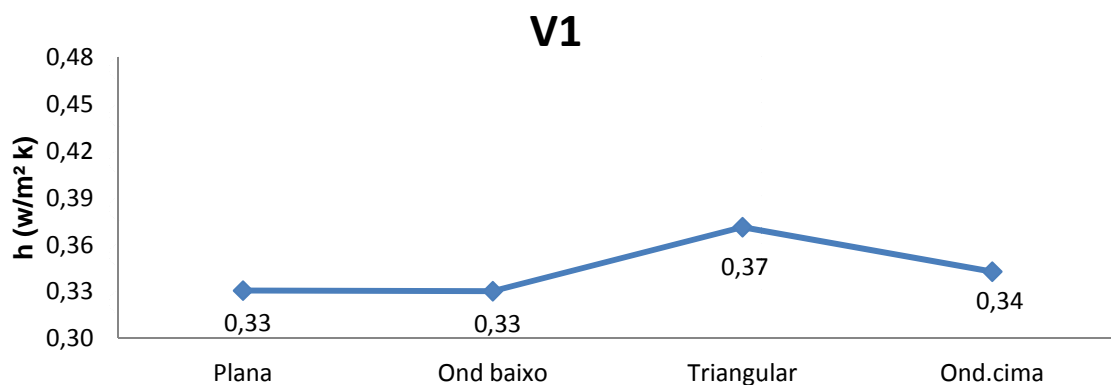


Figura 5.9. Variação do coeficiente de convecção para cada corrugamento na primeira velocidade

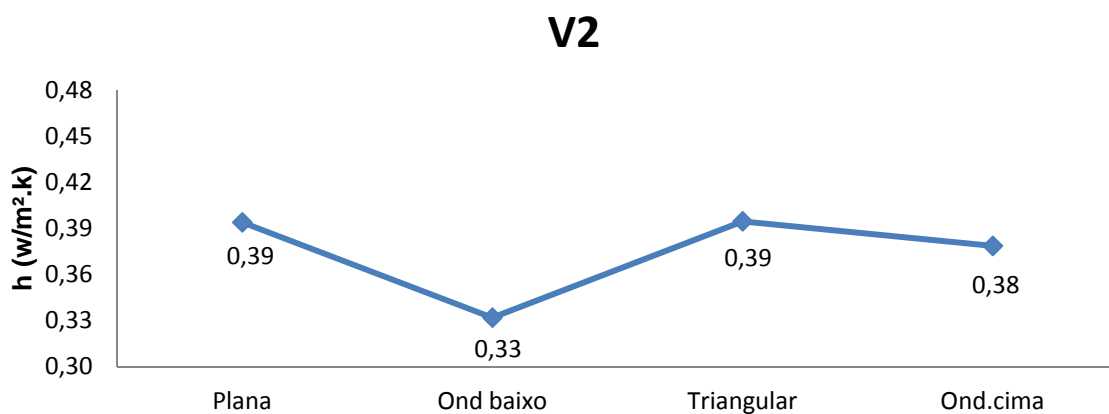


Figura 5.10. Variação do coeficiente de convecção para cada corrugamento na segunda velocidade

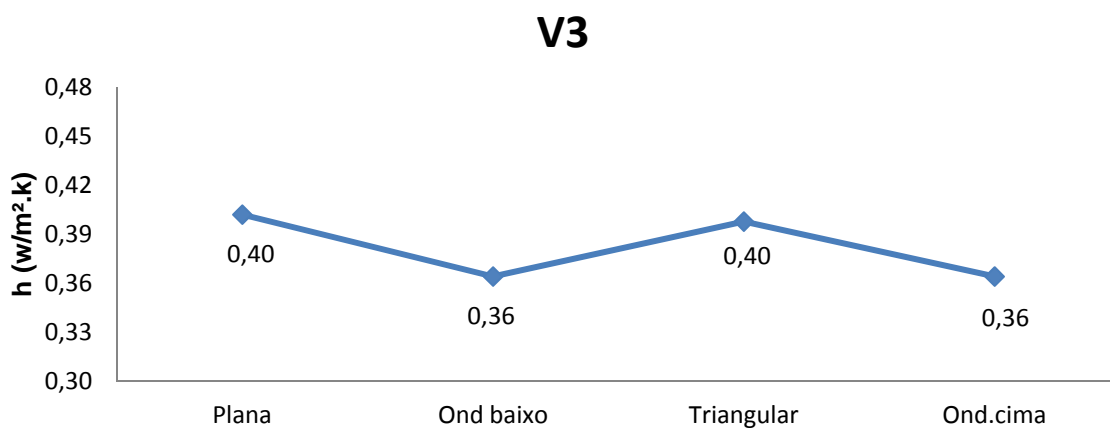


Figura 5.11. Variação do coeficiente de convecção para cada corrugamento na terceira velocidade

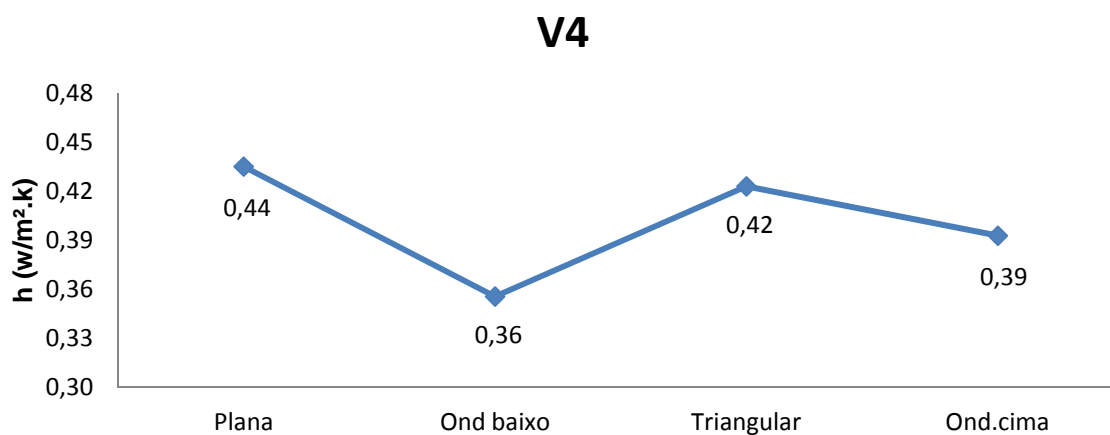


Figura 5.12. Variação do coeficiente de convecção para cada corrugamento na quarta velocidade

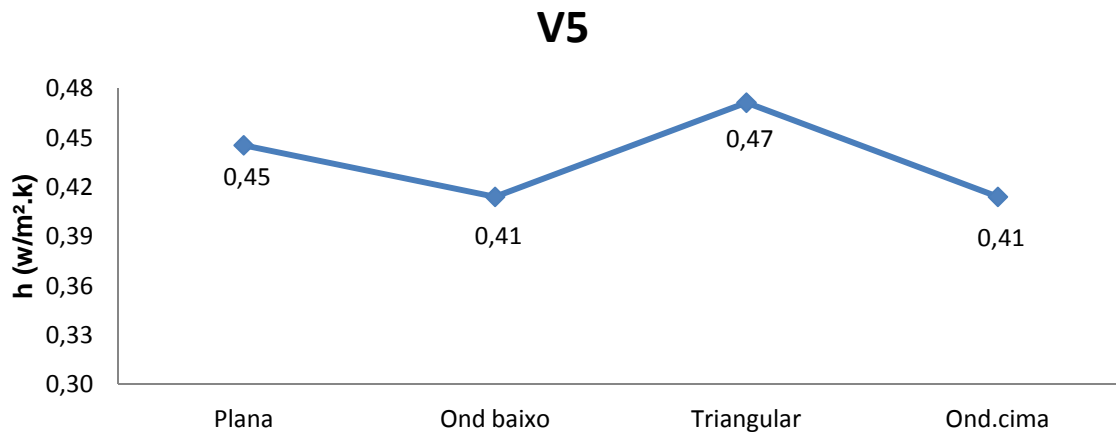


Figura 5.13. Variação do coeficiente de convecção para cada corrugamento na quinta velocidade

Observou-se que o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada para as placas: ondulada para baixo e ondulada para cima, foram menores nas cinco velocidades, evidenciando a ondulada para baixo. As placas triangular e plana, obtiveram os maiores coeficientes convectivos, ficando em evidência a triangular.

### 5.5 Cálculo do calor transferido através da placa

O calor transmitido pelo mecanismo convectivo devido ao jato de fluido para a placa de poliuretano é transportado por condução através da própria. Dessa maneira a metodologia, devido às suas características também permitiu o fornecimento de informações graficadas da taxa de transferência de calor por condução. Puderam-se avaliar as influências da área superficial, espessura, e da diferença de temperatura com a aplicação da lei de Fourier sob condição unidimensional de transferência de calor. A Tabela 5.8 mostra os valores da quantidade de calor que é transportada por condução no sentido da espessura da placa.

Tabela 5.8. Variação da transferência de calor em função da geometria e da velocidade

Controle	Q (w)					
	Plana	Ond.baixo	Frisada	Triangular	Telhado	Ond.Cima
V1	0,02260	0,02502	0,02637	0,02625	0,02571	0,02675
V2	0,02360	0,02432	0,02655	0,02517	0,02571	0,02713
V3	0,02360	0,02520	0,02601	0,02499	0,02571	0,02713
V4	0,02343	0,02467	0,02583	0,02571	0,02553	0,02752
V5	0,02426	0,02537	0,02583	0,02679	0,02517	0,02752

Estabelecida a temperatura de 45°C, controlada na câmara de ar quente circulante, e sendo atingido estado permanente, variou-se a velocidade da entrada de ar aquecido e procederam-se com as medidas das temperaturas superficiais com termovisor.

Considerando a área a qual ocorre a transmissão de calor, como a seção de uma placa plana para as placas corrugadas, tendo-se condutividade do poliuretano retirado da literatura, que é a espessura equivalente relacionada à espessura da placa plana e às duas temperaturas superficiais médias das faces das placas obtidas com o software do aparelho termovisor, observadas por ele através das janelas de inspeção, calculou-se o calor transferido através da placa. Como não houve restrição as placas tipo telhado e frisada foram consideradas nessa análise.

Apesar do calor transferido apresentar valores muito baixos com as respectivas velocidades, observou-se tendências das variações para cada corrugamento.

As placas de superfície plana seguidas da ondulada para baixo foram as placas com menores taxas de transferência de calor por condução e a placa ondulada para cima, com maior taxa de transferência de calor. O que vai ao encontro de maior e menor espessuras ou maior ou menor quantidade de material para transferência de calor, considerando a lei de Fourier. No entanto, as placas triangulares, tipo telhado e frisada possuem a mesma quantidade de material, com espessuras equivalentes praticamente e iguais, conforme visto na Tabela 4.1 e 4.2 do item 4. Essas obtiveram taxas de transferência de calor por condução, diferenciadas em todas as velocidades, ficando mais evidenciado V2, V3 e V5. Figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18.



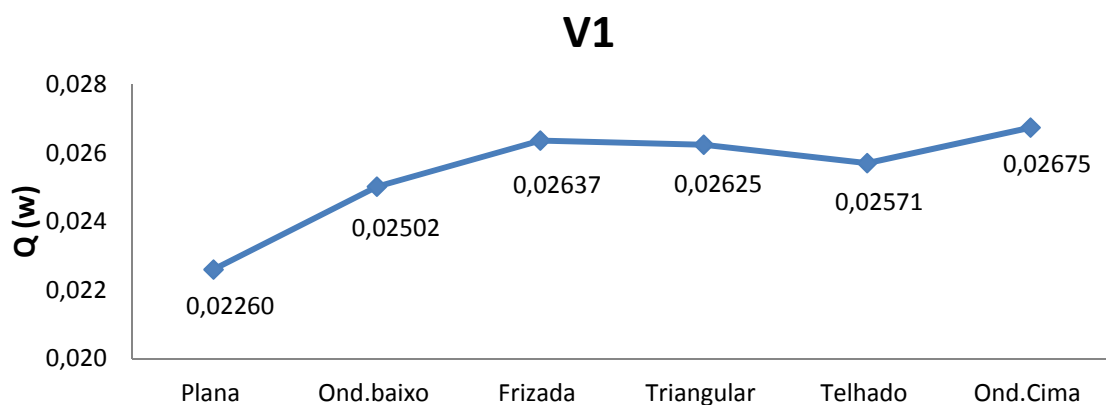


Figura 5.14. Variação do calor transferido em função da corrugamento para primeira velocidade

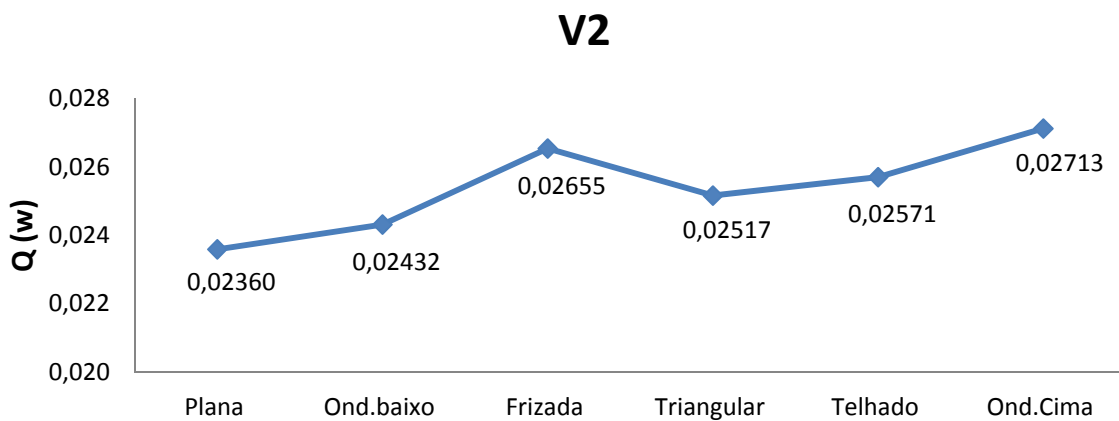


Figura 5.15. Variação do calor transferido em função da corrugamento para segunda velocidade

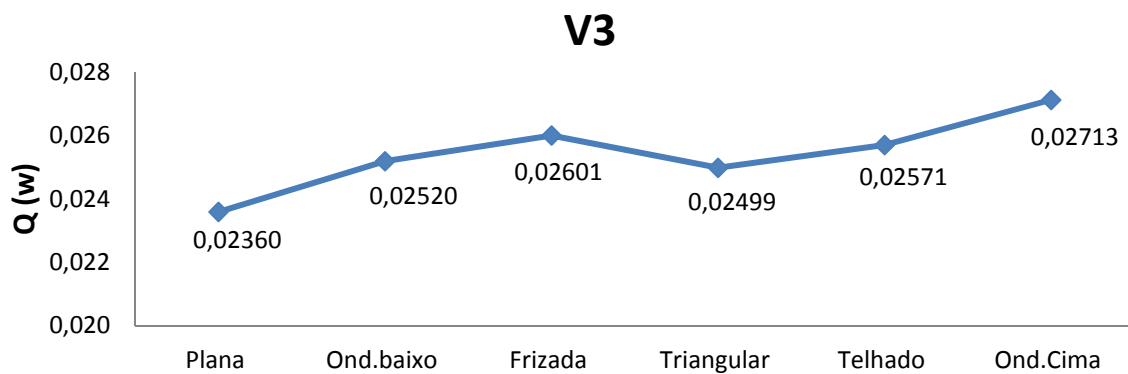


Figura 5.16. Variação do calor transferido em função da corrugamento para terceira velocidade

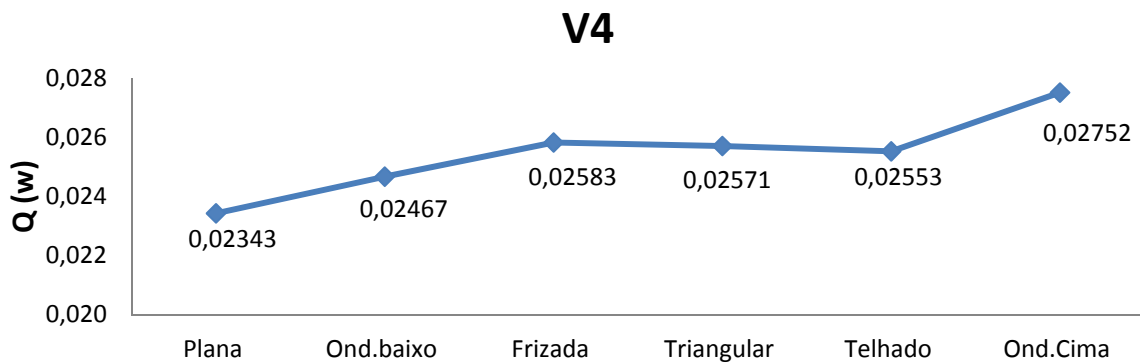


Figura 5.17. Variação do calor transferido em função da corrugamento para quarta velocidade

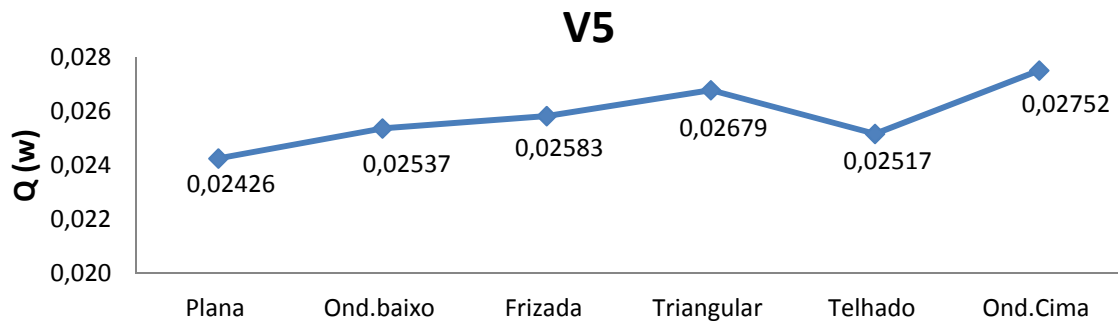


Figura 5.18. Variação do calor transferido em função da corrugamento para quinta velocidade

Logicamente esses resultados são consequência dos efeitos da convecção forçada que responde de forma diferenciada em cada tipo de corrugamento superficial estudado. Como o objetivo desse trabalho foi desenvolver uma metodologia com características para avaliação de transferência de calor por convecção forçada e para determinar o expoente de Reynolds e sua correlação com Nusselt, estudos futuros devem ser realizados para avaliar as variações do coeficiente de transferência de calor por convecção e sua transmissão por condução, através da placa, de acordo com os corrugamentos. Necessita-se, portanto, nesse caso, de uma revisão mais aprofundada sobre aletas, sendo que esses estudos poderão ser analisados futuramente com a metodologia proposta.

## 5.6 Correlações entre Nusselt e Reynolds em função dos corrugamentos

Para as mesmas condições estabelecidas para os experimentos realizados para placa plana, as correlações para as demais geometrias foram realizadas e observou-se que o expoente de proporcionalidade entre Nusselt e Reynolds apresentava oscilações, quando comparados a placa de superfície plana, apontando que não só a relação  $H/D$ ,  $X/D$  e Prandtl influenciam o expoente da correlação entre Nusselt e Reynolds, como informa a literatura, mas também o tipo de corrugamento.

Como já comentado, em relação à placa frisada, apesar de algumas repetições nos experimentos, não foi possível encontrar correlações adequadas assim como para o tipo telhado e, portanto, foram desconsiderados da análise. As Tabelas 5.9, 5.10 e 5.11 mostram as condições de contorno medidas e os devidos cálculos nas quatro últimas colunas, considerando cinco pontos de teste.

Tabela 5.9. Condições de contorno e cálculos para placa triangular

Triangular								
Controle	V (m/s)	T.fq (°C)	Tff (°C)	T Cam (°C)	Q (W)	h (w/m <sup>2</sup> k)	Re	Nu
V1	7,37	39,5	24,9	44,7	0,026	0,37	21.899	1,51
V2	8,95	40,1	26,1	44,8	0,025	0,39	26.594	1,61
V3	10,2	40,2	26,3	44,8	0,025	0,40	30.309	1,62
V4	11,38	40,3	26	44,8	0,026	0,42	33.815	1,72
V5	12,28	40,7	25,8	44,9	0,027	0,47	36.489	1,92

Tabela 5.10. Condições de contorno e cálculos para placa ondulada para cima

Ondulada p/ Cima								
Controle	V (m/s)	T.fq (°C)	Tff (°C)	T Cam (°C)	Q (W)	h (w/m <sup>2</sup> k)	Re	Nu
V1	7,37	39,7	25,8	44,9	0,027	0,34	21.899	1,40
V2	8,95	40	25,9	44,7	0,027	0,38	26.594	1,54
V3	10,2	39,9	25,8	44,6	0,027	0,38	30.309	1,56
V4	11,38	40	25,7	44,6	0,028	0,39	33.815	1,60
V5	12,28	40,2	25,7	44,4	0,028	0,41	36.489	1,69

Tabela 5.11. Condições de contorno e cálculos para placa ondulada para baixo

Ondulada p/ Baixo								
Controle	V( m/s)	T.fq (°C)	Tff (°C)	T Cam (°C)	Q (W)	h (w/m²k)	Re	Nu
V1	7,37	39,6	25,3	44,7	0,025	0,33	21.899	1,35
V2	8,95	39,5	25,6	44,5	0,024	0,33	26.594	1,35
V3	10,2	39,8	25,4	44,5	0,025	0,36	30.309	1,48
V4	11,38	39,9	25,8	44,6	0,025	0,36	33.815	1,45
V5	12,28	40,4	25,6	44,6	0,025	0,40	36.489	1,62

Os resultados gráficos podem ser observados nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21.

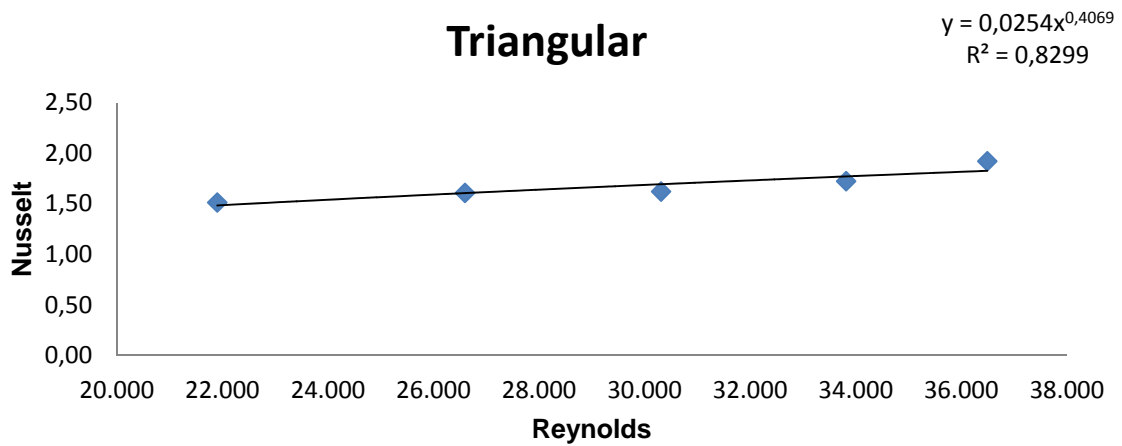


Figura 5.19. Curva da relação entre Nusselt e Reynolds para placa triangular

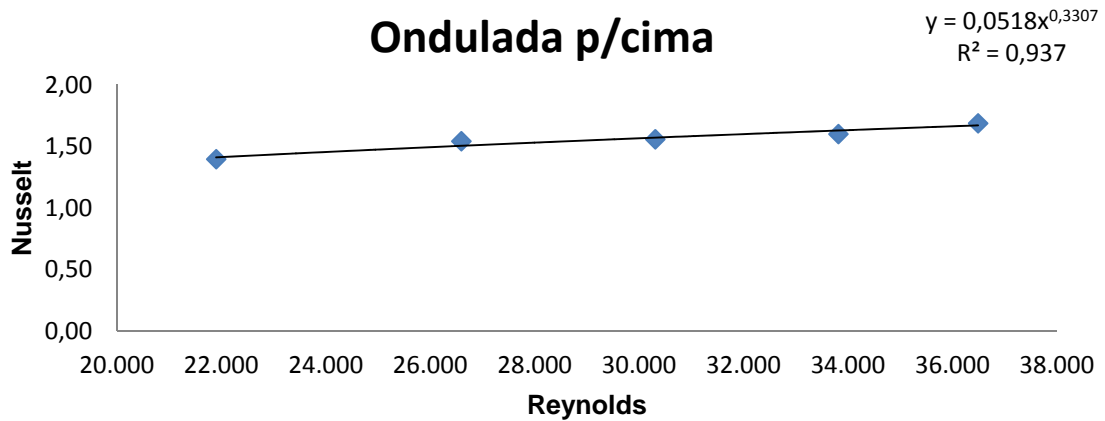


Figura 5.20. Curva da relação entre Nusselt e Reynolds para placa ond.p/cima

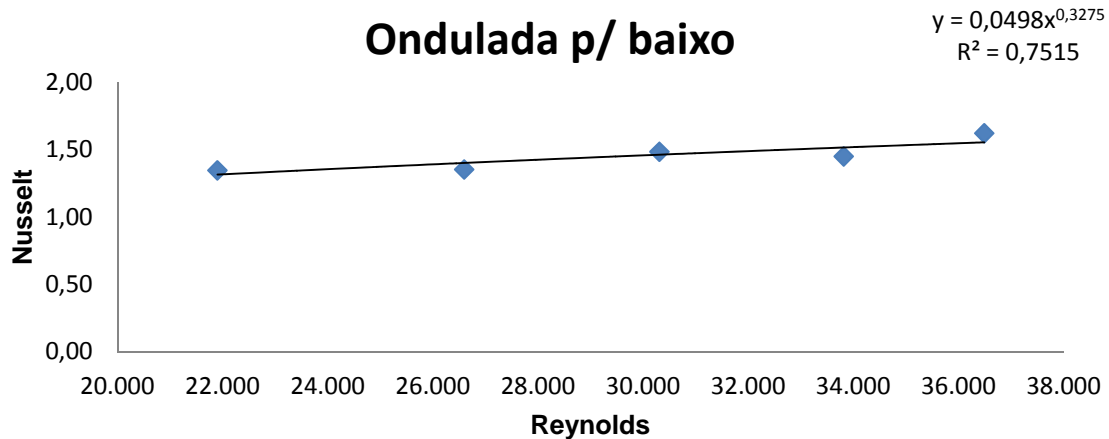


Figura 5.21. Curva da relação entre Nusselt e Reynolds para placa ond.p/baixo

As correlações apontam bons índices de proporcionalidade entre Nusselt e Reynolds com  $R^2$ , assumindo valores aceitáveis entre 0,75 e 0,95. Como já comentado, observou-se que o expoente de Reynolds apresentou variações de acordo com a rugosidade de cada placa, o que permite inferir que o expoente de Reynolds também depende do tipo de corrugamento em estudo, além das relações  $H/D$ ,  $X/D$  e Prandtl como a literatura aponta.

A dinâmica dos experimentos em que são efetuadas as medições de temperatura, é sensível a quaisquer variações que pode interferir nos resultados finais. Qualquer sistema que execute experimentos relacionados à transferência de calor deve ser otimizado com instrumentos de medição de maior grau de precisão possível.

Ter garantia que condições preliminares estabelecidas para os experimentos como condução unidimensional, velocidade, isolamento do sistema e energia fornecida ao sistema, promovem uma maior confiabilidade aos experimentos.

Optou-se em realizar médias de três experimentos para apresentação de cada resultado, assim a observação ficou mais nítida para a modificação de tendência do expoente de Reynolds em relação à placa plana e o que apresenta a literatura. O fato do termovisor possuir precisão de  $\pm 2^\circ\text{C}$  trouxe a necessidade de aumentar os distanciamentos entre os pontos de velocidade e para observar as variações da relação entre os valores de Reynolds com Nusselt com maior nitidez.

Aumentar o distanciamento entre os pontos implica aumentar a capacidade tanto de potência da resistência, quanto de ventilação, o que torna a observação

dos resultados e o controle das variáveis, um processo mais complexo, devido ao aumento da inércia térmica do sistema.

. A experiência com outros tipos de motor CC, com sistema de escovas foi declinada, pois esses motores não apresentavam velocidade constante durante o período dos experimentos.

A garantia de isolamento com uma área maior que a área de teste nas placas, o fechamento das câmaras realizado com parafusos e a redundância nos encaixes das câmaras, garantiu a suposição de condução unidimensional através da placa. As correlações entre Reynolds e Nusselt puderam ser expressadas e comparadas, de acordo com a literatura, com uma placa plana, validando a metodologia.

## 6. CONCLUSÕES

- a) A metodologia proposta alcançou o objetivo proposto e tornou-se funcional para estimar o coeficiente de convecção e número de Nusselt para cada tipo de corrugamento apresentado pela superfície da placa;
- b) Obtiveram-se correlações entre Reynolds e Nusselt para as geometrias estudadas, validando a metodologia para uma placa plana;
- c) Observaram-se que nas superfícies corrugadas ocorre variação no expoente de Reynolds na correlação com Nusselt de modo diferente do que ocorre em uma placa plana;
- d) Ocorrem variações no coeficiente de transferência de calor por convecção e no calor transmitido através das placas, podendo a metodologia indicar qual tipo de corrugamento, seria o mais apropriado para um determinado tipo de aplicação em transferência de calor;
- e) A espuma de poliuretano aceitou boa usinabilidade com mínimo desgaste de ferramenta, garantindo com sucesso a confecção das geometrias das superfícies das placas que não apresentaram nenhuma fragilidade em nenhum momento dos experimentos;
- f) Fácil usinabilidade do poliestireno, precisão nos encaixes, vedação adequada e resistência devido à grande área de contato entre as câmaras;
- g) As variações nas espessuras das placas, devido a alguma deformação foram remotas, mostrando que o teste não deforma as placas nem o poliestireno utilizado com aperto dos parafusos de ajuste.

## 7. TRABALHOS FUTUROS

- a) Reconhecimento maior das fugas de calor para tornar a metodologia capaz de avaliar a condutividade térmica para poliuretano e poliestireno;
- b) Estudar a influência das geometrias na troca de calor por convecção natural e radiação;
- c) Estudar a transferência de calor para mais tipos de corrugamentos;
- d) Adaptar sistema de aquisição de dados em tempo real também para aquisição de imagens termográficas por câmera com conectividade em rede;
- e) Elaborar um controle da câmara fria por sistema de evaporador e condensador, utilizados em refrigeração de alimentos;
- f) Avaliar os estudos das superfícies corrugadas com variações, utilizando outras configurações de temperatura, velocidades e distanciamento entre placa e bocal;
- g) Estudar a absorvidade de calor pelo poliuretano, utilizando-se de outras temperaturas.



## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11620- Espuma rígida de poliuretano determinação do conteúdo de células fechadas.** Rio de Janeiro: ABNT, maio 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 12094- Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmico determinação da condutividade térmica.** Rio de Janeiro: ABNT, fev. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6578- Determinação de absorção de água em espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento térmica.** Rio de Janeiro: ABNT., mar. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11506. Espuma rígida de poliuretano para fins de isolamento Térmica. Determinação da massa específica aparente.** Rio de Janeiro: ABNT, fev. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15220-4 Desempenho térmico de edificações. Parte 4: Medição da resistência térmica da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida** Rio de Janeiro: ABNT, fev. 2003.

AKUTSU, Maria; SATO, Neide Matiko Nakata. Propriedades termofísicas de materiais e componentes de construção. In: **TECNOLOGIA de edificações.** São Paulo: PINI; IPT, 1988. p. 519-522.

ALMEIDA, F. A. **Conhecendo um pouco mais sobre poliuretano.** 2002.

ALVES, W. F. **Preparação e caracterização de blendas de poliuretano derivado do óleo de mamona e poli (o-metoxianilina) e sua avaliação como sensor.** Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – PPGCEM, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

ANWARULLAH.M, VASUDEVA RAO.V, SHARMA K.V. Effect of Nozzle Spacing on Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics of an Impinging Circular Jet in Cooling of Electronic Components. **Int. J. of Thermal & Environmental Engineering**, v. 4, n. 1, 7-12, 2012.

ARMELIN, H. S.; CHERRY, N. Avaliação do uso e desempenho de barreiras de radiação térmica na construção civil. **Revista e-Mat**, v. 1, n.1, p. 79-82, maio 2004.

BAKKE, P. An experimental investigation of a walljet. **Journal Fluid Mechanics**, v. 2, p. 467-472, 1957.

BECK, J. V.; BLACKWELL, B.; ST. CLAIR JR., C. R. **Inverse Heat Conduction**, Wiley, New York, 1985.

BECKER, D. Blendas PP/PU: **Estudo do efeito do agente compatibilizante e reciclagem de resíduo de PU.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BELTAOS, S; RAJARATNAM, N. Impingement of axisymmetric developing jets. **Journal of Hydraulic Research**, v. 15, n. 4, p. 311-325, 1977.

BEZERRA, L. A. C. **Análise do desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com EPS como agregado graúdo.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

BOLSONI, Elisandra. **Estudo do reaproveitamento e reutilização das espumas rígidas de poliuretano pós-consumo.** Disponível na internet: <<http://www.pipe.ufpr.br/defesas/Elisandra%20Bolsoni.PDF>>. Acesso em: 29 jan. 2009.

BRIENZA, D. M.; BRUBAKER, C. E.; MCLAURIN, C. A.; CHUNG, K.-C. Manufacturing system for contoured fo cushions. In: **Journal of Rehabilitation Research and Development**, v. 29, n. 4, 1992.

CALLISTER, W. D., **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 8. ed. 2013. 817p.

CARAMALHO, A. **Vinte cinco anos de termografia**. 2012. 464p.

CARVALHO, N. F. **Esquemas para calcular a condutividade térmica nas faces de volumes finitos**. Curitiba, 2001. 150f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na Área de Fenômenos de Transporte e Mecânicas dos Sólidos) - Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2001.

CAVALCANTI, M. **Análise da influência de superfícies refletivas nas perdas de calor de sistemas térmicos**, Natal RN, 2011. 83 p. Pós-Graduação em Engenharia de Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia. Rio Grande do Norte, 2011.

CENGEL, Y. A. **Heat Transfer: a practical approach**. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

COLUCCI, D. W.; VISKANTA, R. Effect of nozzle geometry on local convective heat transfer to a confined impinging air jet. *Experimental Thermal and fluids*. **Science**, v. 13, p. 71-80, 1996.

CONTIJO, R. G. **Um estudo numérico sobre transferência de calor na camada limite turbulenta**. Brasília, 2009, 297p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal de Brasília. Brasília, 2009.

COOPER, D. et al. Impinging Jet Studies for Turbulence Model Assessment – II. An Examination of the Performance of Four Turbulence Models, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 1993, v. 36, n. 10, p. 2685-2697.

DÂMASO, H. G. **Obtenção de substratos têxteis com propriedades térmicas e ignífugas**. Covilhã, 2009, 130p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciência e Tecnologias Têxteis. Universidade da Beira Interior, 2009.

DARÉ, C. A. N. et al. Avaliação da eficiência de isolantes térmicos por reflexão, utilizados como subcoberturas. **Energ. Agric, Botucatu**, v. 20, n. 2, p. 14-29, 2005.

DAVIES, J. M. "Lightweight sandwich construction"; Blackwell Science Ltd; Oxford, 2001.

DHOKIA, V. G.; KUMAR, S.; VICHARE, P.; NEWMAN, S. T. An intelligent approach for the prediction of surface roughness in ball-end machining of polypropylene. In: **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, n. 24, p. 835-842, 2008.

DOWNS, S. J., and JAMES, E. H. **Jetimpigement heat transfer**: a Literature Survey, ASME, paper n° 87-HT-35.1987.

EMANUELLE. Mechanical properties of high density polyurethane foams: I Effect of the density. **Composites Science and Technology**, v. 66, p. 2700-2708, 2006.

ESCUADERO, C. et al. Experimental thermal characterization of radiant barriers for building insulation. **Energy and Buildings**, v. 59, ano 10, p. 62-72, 2013, Vitoria-Gasteiz, Spain 21 December 2012.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995.

FILHO, W. B. **Transmissão de Calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

GAUNTNER, J. W.; LIVINGOOD, J. N. B.; HRYCAK, P. **Survey of literature on flow characteristics of a single turbulent jet impinging on a flat plate**. NASA TN D-5652 NTIS N70-18963. 1970.

GLAUERT, M. B. The walljet. **Journal Fluid Mechanics**, v.1, p. 625-643, 1956.

GOLDSTEIN, R. J.; BEHBAHANI, A. I.; HEPPELMANN, K. K. Streamwise distribution of the recovery factor and the local heat transfer coefficient to an

impinging circular air jet. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 29, edição 8, 1986, p. 1227-123.

GUERRA, D. S. Análise teórica experimental de um jato de ar turbulento que incide ortogonalmente sobre uma placa plana aquecida. Rio de Janeiro, 2004. 237p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

HUANG, M.S. EL-GENK, Heat transfer of an impinging Jet on a flat surface. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 37, n. 13, 1994, p. 1915-1923.

INCROPERA, F. P; De WITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.

INFRATEMP. **Soluções para processos industriais**. Disponível em: <<http://www.infratemp.com.br>>. Acesso em: 05 jul. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTUDOS E PESQUISAS – INEP. Portal INEP disponível em: <[www.inep.gov.br](http://www.inep.gov.br)>. Acesso em: 11 jul. 2015.

JARAMILLO, R. B. **Estudo da viabilidade de processos de usinagem utilizando um manipulador robótico**. Monografia (Graduação), Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, 2011.

JAMBUNATHAN. K et al. A review of heat transfer data for single circular jet. **Int. J Heat and fluid flow**. v. 13, n. 2, june 1992.

KLEMPNER, D.; SENDIJAREVIC, V. **Polymeric foams and foam technology**. 2. ed. **Hanser Verlag**: USA, 2004.

KREITH, F.; BOHN. **Princípios de transferência de calor**. São Paulo: Edgard Blucher, 1997.

LABRINCHA. J, **Associação para desenvolvimento da casa do futuro. Subprojeto de isolamento térmico, primeiro relatório de progresso**. Universidade de Aveiro. Portugal, mar. 2006.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

LI, C. Y.; GARIMELLA, S. V. Prandtl-number effects and generalized correlations for confined and submerged jet impingement, **In.J.Heat Mass Transfer**, v. 44, p. 3471-3480, 2001.

LIN, Z.H. **Heat transfer behaviors of a confined slot jet impingement**. Department of power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University, Hsinchu, 1995. v. 4, 5p.

LYTLE, D.; WEBB, B. W. Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacing, **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 37, n. 12, p. 1687-1697, 1994.

MALDAGUE, X. V. **Theory and practice of infrared technology for non destructive testing**. New York: John Wiley, 2001.

MARTIN, H. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solids surfaces. **Advances in Heat Transfer**, v. 13, p. 1-60, 1977.

MAZURECK, K. A. **Scour of clay by jets**. PhD thesis, University of Alberta, Edmonton, Alta, Canada, 2001.

MCBRAYER, R. L.; WYSOCKI, D. C. **Polyurethane foams formulation and manufacture**, Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, 1998.

MICHELS, C. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes**. Florianópolis, 2007.

MODAL, P.; KHAKHAR, D. V. Regulation of cell structure in water blown rigid polyurethane foam. **Macromolecular Symposia**, v. 216, p. 241-254, 2004.

MODEST, M. F. **Radiative heat transfer**. Singapore: McGraw Hill Int. Editions, 1993, Singapore, 832 p.

MOURA, L. M. **Desenvolvimento de um protótipo de placa quente protegida.** Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. Florianópolis, 1993.

MUTHUKANNAN. M. Flow Field and Heat Transfer Investigation of a Confined Laminar Slot Air Jet on a Solid Block. **Journal of Applied Fluid Mechanics**, v. 9, n. 4, p. 1679-1694, 2016.

OBOT, N. Y.; MUJUMDAR, A. S.; DOUGLAS, W. J. M. Effect of semi-confinement on impingement heat transfer. Proc. 7th **Int. Heat Transfer Conf.**, Munchen, Germany, Sept. 6-10, 3, p. 395-400, 1982.

OLARI, John R.; ALLEN, Donald L. **Process for machining a flexible foam.** Patente. United States Patent application publication. US 2004/0089963 A1. Maio 13, 2004.

OLIVEIRA, J. H. **Inspeção automatizada utilizando termografia.** Porto Alegre 2010. 102p Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

ORDENES, M. et al. **Transferência de calor na envolvente da edificação.** Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina - Centro Tecnológico. Florianópolis, 2008.

ÖZISIK, M. Necati. **Transferência de calor um texto básico.** Rio de Janeiro: Guanabara, 1990.

RIBEIRO, L. C. Medição da condutividade térmica de materiais sólidos não condutores **In: 13º POSMEC** - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Uberlândia: Uberlândia, 2003.

RODRIGUES, E. V. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de resfriamento evaporativo, por aspersão intermitente na cobertura de aviários usando modelos de escala distorcida.** 1988. 178p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1988.

SAINT-MICHEL, Fabrice; CHAZEAU, Laurent; CAVAILLÉ, Jean-Yves; CHABERT, Emanuelle. Mechanical properties of high density polyurethane foams: I Effect of the density. **Composites Science and Technology**, v. 66, p. 2700-2708, 2006.

SAN, J. Y.; HUANG, C. H.; SHU, M. H. Impingement cooling of a confined circular air Jet. **Int. J Heat Mass Transfer**, v. 40, n. 6, p. 1355-1364, 1997.

SAN, J. Y.; SHIAO, W. Z. Effects of jet plate and plate spacing on the stagnation Nusselt number for a confined circular air jet impinging on a flat surface. **Int. J Heat Mass Transfer**, v. 49, p. 3477-3486, 2006.

SANTOS.L. **Termografia infravermelha em subestações de alta tensão desabrigadas**. 2006. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2006.

SANTOS, W. N. **Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: I - O método de pulso de energia**, *Cerâmica* 51 205-213, 2005.

SANTOS, W. N. et al. Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 5, p. 354-359, 2004.

SEO, Dongjin; YOUN, Jae Ryoum. Numerical analysis on reaction injection molding of polyurethane foam by using a finite volume method. **Polymer**, v.46, p. 6482-6493, 2005.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVA, F. P.; BERETTA, E. M.; KINDLEIN JUNIOR, W. **Avaliação da usinabilidade de espumas flexíveis de poliuretano**. In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011, Caxias do Sul. Anais do VI COBEF. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ABCM, 2011.



SILVA, P. W. J. **Simulação numérica de um jato compressível de ar incidente sobre uma placa plana aquecida**. XV Congresso de engenharia mecânica 1999, Águas de Lindóia, SP.

SIMIONI, W. I. **Análise de erros na medição de condutividade térmica de materiais através do método fluximétrico**. Florianópolis. 2005. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Área de concentração: Construção Civil, Santa Catarina, 2005.

SOUSA, V. A. L. **Estudo do comportamento de materiais não convencionais utilizados como revestimento de paredes, visando à redução de carga térmica**. 2012. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) - Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2012.

SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005.

TÁVARA, D. I. M. Estudo numérico de jato circular espiralado incidente em uma placa aquecida. 2011. 201p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

THIRUMAL, A. **Mechanical, morphological and thermal properties of rigid polyurethane foan: effect of the fillers, cellular polymers**. 2007 26,4 Proquest central 245.

TORREIRA, R. P. **Isolamento térmico: calor e frio**. São Paulo: Fulton, 1980. Disponível em: <<http://www.metlica.com.br/poliuretano>>.

TROUSSART, L. R. Analysis of errors in guarded hot plate measurements as compiled by the finite element method. Guarded hot plate and heat flow meter methodology, ASTM STP 879, **American Society of Testing Materials**. Philadelphia, 1985.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Instituto de Física. Disponível em: <[www.fisica.ufmg.br](http://www.fisica.ufmg.br)>. Acesso em: 11 jul. 2015.

VILAR, WALTER. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Vila consultoria, 1998. 1.1- 1.7 p.

## **ANEXO**

### **FICHAS TÉCNICAS DOS CONSTITUINTES DA ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO DAS PLACAS DE TESTE**



Av. Jose Lutzenberger, 170  
 Bairro : Anchieta - 90200 140  
 Porto Alegre - RS - Brasil  
 Central de Atendimento : 55 51 3275 8500  
[www.polisystem.ind.br](http://www.polisystem.ind.br)

## **POLITANE 101 F**

### **ESPUMA RÍGIDA DE POLIURETANO COM HCFC**

**POLITANE 101 F** é polioli aditivado contendo HCFC como agente expensor (Conforme exigência do Protocolo de Montreal). Que em conjunto com o **ISOTANE DM**, dentro das devidas proporções, produz espuma de poliuretano. Este polioli pode ser processado por máquinas injetoras, bem como por agitação manual.

O **POLITANE 101 F** produzirá espumas com densidade moldada de 33 a 40 Kg/m<sup>3</sup>. Recomenda-se sua utilização como isolante térmico nos segmentos de: painéis para construção civil, geladeiras, câmaras frigoríficas, tanques de armazenagem, tanques resfriadores, tubulações, etc.

**OBS:** Quando necessária a produção de espumas com densidade moldada acima de 40 kg/m<sup>3</sup>, recomendamos a utilização do **POLITANE 103 F**.

#### **PROPORÇÃO DOS COMPONENTES EM PESO**

Politane 101 F : 100  
 Isotane DM : 110

#### **TEMPO DE REAÇÃO À 25°C**

Tempo de creme: 15 a 20 seg.  
 Tempo de gel: 90 a 150 seg.  
 Tempo de pega livre: 140 a 210 seg.

#### **DENSIDADE LIVRE**

Densidade : 26 A 29 Kg/m<sup>3</sup>

Sistemas de Poliuretano  
 Distribuidor de Resina Poliéster, Fibra de Vidro,  
 Gel Coat, Ceras Desmoldante e Componentes p/Fiberglass  
 Av. Jose Lutzenberger, n. 170 – 90200 140 – Anchieta - Porto Alegre – RS – Brasil  
 Central de Atendimento 55 (51) 3275 8500 -  
[www.polisystem.ind.br](http://www.polisystem.ind.br) - [polisystem@polisystem.ind.br](mailto:polisystem@polisystem.ind.br)



Av. Jose Lutzenberger, 170  
 Bairro : Anchieta - 90200 140  
 Porto Alegre - RS - Brasil  
 Central de Atendimento : 55 51 3275 8500  
[www.polisystem.ind.br](http://www.polisystem.ind.br)

## ISOTANE DM

### Descrição do produto:

O ISOTANE DM é o diisocianato de difenilmetano polimérico (MDI). É um líquido de cor castanho escuro que usado em combinação com polióis da linha POLITANE, produz espuma rígida de poliuretano.

### Propriedades típicas:

análise	unidade	valor
teor de NCO	%	30,5 – 32,5
aparência	visual	líq. Castanho escuro
viscosidade (25°C)	cp	160 - 240
densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,20 – 1,24

### Armazenagem:

A temperatura favorável para armazenamento se situa na faixa de 10 a 30°C. Quando submetido à temperaturas inferiores a 0°C o produto pode apresentar cristalização parcial. Caso isto ocorra o conteúdo total da embalagem deve ser aquecido à uma temperatura máxima de 70°C sob homogeneização até que a cristalização seja eliminada por redissolução. Esta operação pode aumentar o conteúdo de sedimentos insolúveis, usualmente sem comprometimento de sua aplicabilidade.

Sistemas de Poliuretano  
 Distribuidor de Resina Poliéster, Fibra de Vidro,  
 Gel Coat, Ceras Desmoldante e Componentes p/Fiberglass  
 Av. Jose Lutzenberger, n. 170 – 90200 140 – Anchieta - Porto Alegre – RS – Brasil  
 Central de Atendimento 55 (51) 3275 8500 -  
[www.polisystem.ind.br](http://www.polisystem.ind.br) - [polisystem@polisystem.ind.br](mailto:polisystem@polisystem.ind.br)