



Júlio Dutra Brionizio

**Estudo do Método de Medição de
Condutividade Térmica e Teor de Água
por Meio de Geometria Esférica:
Aplicação em Soluções Aquosas de Etanol**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica da PUC - Rio como parte
dos requisitos parciais para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando
Coorientador: Dr. Georges Henri Bonnier

Rio de Janeiro
Abril de 2013



Júlio Dutra Brionizio

**Estudo do Método de Medição de
Condutividade Térmica e Teor de Água
por Meio de Geometria Esférica:
Aplicação em Soluções Aquosas de Etanol**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Alcir de Faro Orlando

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Georges Henri Bonnier

Coorientador

Inst. Nac. de Metrol., Qual. e Tecnologia – Inmetro

Dr. Humberto Siqueira Brandi

Inst. Nac. de Metrol., Qual. e Tecnologia – Inmetro

Prof. Hércio Rangel Barreto Orlande

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Dalni Malta do Espírito Santo Filho

Inst. Nac. de Metrol., Qual. e Tecnologia – Inmetro

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do

Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de abril de 2013

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

Júlio Dutra Brionizio

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Gama Filho em 1998. Recebeu o título de Mestre em Sistemas de Gestão pela Universidade Federal Fluminense em 2006. Trabalha no Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) desde 1998 como Pesquisador/Tecnologista. Atua como avaliador técnico da Rede Brasileira de Calibração (RBC). Ministra treinamentos nas áreas de metrologia térmica e higrometria.

Ficha Catalográfica

Brionizio, Júlio Dutra

Estudo do método de medição de condutividade térmica e teor de água por meio de geometria esférica : aplicação em soluções aquosas de etanol / Júlio Dutra Brionizio ; orientador: Alcir de Faro Orlando ; coorientador: Georges Henri Bonnier – 2013.

168 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Condutividade térmica. 3. Teor de água. 4. Sensor de esfera quente. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Bonnier, Georges Henri. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Ao meu filho Felipe, razão do meu viver.

À minha esposa Deise, companheira de muitas caminhadas.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, pela vida e por tudo que sempre me proporcionaste.

Ao meu orientador, professor Alcir de Faro Orlando, pela valiosa orientação, pelo apoio, consideração e confiança no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu coorientador, Dr. Georges Bonnier, por ter trazido esta oportunidade até mim, pela orientação, pela confiança e por todo apoio na elaboração deste estudo.

À minha esposa Deise e ao meu filho Felipe, que me deram muita força e que muito me apoiaram e me incentivaram em todos os momentos.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus pais, alicerces da minha formação moral e acadêmica, pelo incentivo que sempre ofereceram para a concretização dos meus sonhos.

Ao Inmetro, por mais esta oportunidade de desenvolvimento profissional.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Mecânica pelo suporte e pelos ensinamentos que contribuíram para a minha formação como pesquisador.

Ao professor Maurício Frota e a todos os colegas da PUC-Rio.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

Ao colega Luiz Henrique Paraguassú de Oliveira, pela amizade, pelos conselhos, e pelo incentivo desde o momento em que eu cogitei em ingressar no curso até agora. Muito obrigado por tudo!

Aos colegas de laboratório, Hamilton e Thaís, pelo incentivo e por todo apoio.

A todos os colegas da Diter que estiveram sempre ao meu lado me incentivando, me apoiando e torcendo por mim.

A todos os amigos e familiares que me acompanharam ao longo desta caminhada e que muito torceram para mim. Obrigado pela paciência!

Aos colegas que têm uma parcela de contribuição neste resultado final, tais como: Paulo Couto, Pedro Costa, Valnei Smarcaro e Leonardo.

A todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a elaboração desta pesquisa.

Resumo

Brionizio, Júlio Dutra; Orlando, Alcir de Faro; e Bonnier, Georges Henri. **Estudo do Método de Medição de Condutividade Térmica e Teor de Água por Meio de Geometria Esférica: Aplicação em Soluções Aquosas de Etanol**. Rio de Janeiro, 2013. 168 p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presente tese tem por objetivo o estudo teórico e experimental, seguindo as boas práticas metrológicas, de um método baseado em uma fonte esférica de calor para medição da condutividade térmica de líquidos, com foco em soluções aquosas de etanol, e posterior determinação do teor de água da substância. O estudo e o desenvolvimento de métodos de medição de condutividade térmica são essenciais em diversas aplicações de engenharia, visto que, em consequência das justificadas demandas atuais de economia e uso racional de energia térmica, a transferência de calor com a máxima eficiência possível é de extrema relevância. A medição do teor de água também é um relevante parâmetro em muitas áreas de pesquisa e nos setores industriais, pois a quantidade de água nas substâncias influencia vários processos físicos, químicos e biológicos. Contudo, a quantidade de equipamentos disponíveis no mercado para a medição de ambas as grandezas não é vasta. O método da esfera quente, em princípio, é um método absoluto de medição da condutividade térmica, o que significa que o sensor pode fornecer um resultado sem ser calibrado. Porém, alguns parâmetros do modelo precisam ser analisados isoladamente ou obtidos por meio de calibração. Embora haja alguns estudos sobre este método, poucos têm os meios líquidos como foco principal. Ademais, tais estudos não correlacionam a condutividade térmica do material com o seu teor de água e nem realizam uma análise metrológica mais criteriosa, de modo a determinar minuciosamente as incertezas de medição. A aplicabilidade do método para medição da condutividade térmica e do teor de água das soluções analisadas mostrou-se bastante satisfatória, pois os resultados obtidos neste estudo apresentaram muito boa concordância com os valores propostos por vários pesquisadores e com as medições realizadas no Inmetro por outros métodos.

Palavras-chave

Condutividade Térmica; Teor de Água; Sensor de Esfera Quente.

Abstract

Brionizio, Júlio Dutra; Orlando, Alcir de Faro (advisor); Bonnier, Georges Henri (co-advisor). **Study of the Measuring Method of Thermal Conductivity and Water Content by Means of Spherical Geometry: Applications on Aqueous Solutions of Ethanol.** Rio de Janeiro, 2013. 168 p. DSc. Thesis, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The aim of this thesis is the experimental and theoretical study, following the good metrological practices, of a method based on a spherical heat source in order to measure thermal conductivity of liquids, focusing on aqueous solutions of ethanol, with later determination of the water content of the substance. The study and the development of measuring methods of thermal conductivity are essentials in several engineering applications, since as a consequence of the current justified demands on saving and rational use of thermal energy, the heat transfer with the maximum efficient as possible is of great relevance. The measurement of the water content is also a relevant parameter in several research areas and industrial sectors, since the quantity of water in the substances influences several biological, chemical and physical processes. However, the amount of equipment available on the market for the measurement of both quantities is not vast. The heated sphere method, in principle, is an absolute one for the measurement of the thermal conductivity, which means that the sensor may furnish a result without a calibration. Nevertheless, some parameters of the model need to be analyzed separately or obtained by means of calibration. Although there are some studies on this method, few of them have liquids as the main focus. Moreover, these studies do not correlate the thermal conductivity of the material with its water content, and they do not perform a more careful metrological analysis in order to determine the measurement uncertainties. The applicability of the method to measure the thermal conductivity and the water content of the analyzed substances proved to be satisfactory, because the obtained results of this study presented a very good agreement with the values proposed by several researches and with the measurements performed at Inmetro by other methods.

Keywords

Thermal conductivity; Water Content; Heated Sphere Sensor.

Sumário

1. Introdução

1.1. Contextualização	20
1.2. Motivação	23
1.3. Objetivos	24
1.4. Metodologia da Pesquisa	25
1.5. Estrutura da Tese	26

2. Fundamentação Teórica

2.1. Lei de Fourier	28
2.2. Equação da Condução de Calor	29
2.3. Condutividade Térmica	31
2.3.1. Dependência da Pressão e da Temperatura	33
2.3.2. Nos Sólidos	36
2.3.3. Nos Gases	36
2.3.4. Nos Líquidos	37
2.4. Métodos de Estimativa da Condutividade Térmica de Líquidos	39
2.4.1. Equações de Filippov	40
2.4.2. Equação de Touloukian <i>et al.</i>	41
2.4.3. Equação de Miller e Yaws	42
2.4.4. Equação de Reid <i>et al.</i>	42
2.4.5. Equação de Assael <i>et al.</i>	42
2.4.6. Equação de Ramires <i>et al.</i>	43
2.4.7. Equação da IAPWS	44
2.4.8. Equações do KDB	44
2.4.9. Considerações	45
2.5. Métodos de Medição de Condutividade Térmica	46
2.5.1. Método da Placa Quente Protegida	46
2.5.2. Método <i>Laser-Flash</i>	48
2.5.3. Método dos Cilindros Concêntricos	49
2.5.4. Método das Esferas Concêntricas	51
2.5.5. Método da Fonte Plana Transiente	51
2.5.6. Método do Fio Quente	53

2.5.7. Método da Tira Quente	56
2.5.8. Método da Sonda Agulha	57
2.5.9. Método 3ω	58
2.5.10. Método do Sensor Esférico	59
2.5.11. Considerações	59
2.6. Métodos de Medição do Teor de Água de Líquidos	60
2.6.1. Karl Fischer	60
2.6.2. Método Óptico	61
2.6.3. Método Ultrassônico	62
2.6.4. Método Elétrico	62
2.6.5. Método por Medição de Condutividade Térmica	62
2.6.6. Considerações	63
2.7. Normalização	63
2.7.1. Teor de Água	63
2.7.2. Condutividade Térmica	64
2.8. Convecção Natural	65
3. Medição de Condutividade Térmica por Geometria Esférica	
3.1. Introdução	68
3.2. Termistores	78
3.3. Modelos de Transferência de Calor	79
3.4. Parâmetros de Influência na Medição	83
3.4.1. Capacidade Térmica do Sensor de Esfera Quente	85
3.4.2. Resistência Térmica de Contato	85
3.5. Parâmetros Experimentais	87
3.5.1. Tamanho da Amostra	87
3.5.2. Incremento de Temperatura	88
4. Materiais e Métodos Experimentais	
4.1. Introdução	90
4.2. Meio Térmico	90
4.3. Sensores de Esfera Quente	91
4.3.1. Calibração dos Termistores	92

4.3.1.1. Padrão de Referência	93
4.3.1.2. Procedimento de Calibração	94
4.3.1.3. Resultados e Incertezas de Medição	94
4.3.2. Caracterização Dimensional	95
4.3.2.1. Padrão de Referência	96
4.3.2.2. Resultados e Incertezas de Medição	96
4.3.3. Caracterização Elétrica	97
4.3.3.1. Padrões de Referência	97
4.3.3.2. Procedimento de Caracterização	98
4.3.3.3. Resultados e Incertezas de Medição	98
4.4. Amostras	99
4.4.1. O Etanol	99
4.4.2. Preparação e Caracterização das Amostras	100
4.5. Procedimento Experimental	101
4.5.1. Posicionamento dos Sensores nas Amostras	101
4.5.2. Preparação do Banho e Climatização das Amostras	102
4.5.3. Configuração e Aquisição de Dados	103
4.5.4. Parâmetros de Medição	104
4.5.5. Alcance do Regime Permanente	105
4.5.6. Convecção Natural	106
5. Resultados e Incertezas de Medição	
5.1. Introdução	108
5.2. Conceitos sobre Incerteza de Medição	111
5.2.1. Tipos de Distribuição	111
5.2.2. Tipos de Avaliação da Incerteza-Padrão	111
5.2.2.1. Avaliação do Tipo A	111
5.2.2.2. Avaliação do Tipo B	112
5.2.3. Coeficientes de Sensibilidade	112
5.2.4. Incerteza-Padrão Combinada	112
5.2.5. Fator de Abrangência	113
5.2.6. Incerteza Expandida	114
5.3. Validação do Método	114

5.4. Incremento de Temperatura da Amostra	116
5.5. Determinação da Condutividade Térmica	117
5.5.1. Utilizando o Raio Dimensional da Esfera	117
5.5.2. Utilizando o Raio Efetivo da Esfera	118
5.5.3. Modelagem Desenvolvida	122
5.6. Análise de Incerteza da Condutividade Térmica	126
5.6.1. Incerteza-Padrão da Resolução do Dispositivo Indicador	127
5.6.2. Incerteza-Padrão dos Valores da Literatura	127
5.6.3. Incerteza-Padrão do Ajuste de Curva	128
5.6.4. Incerteza-Padrão da Razão Experimental $\dot{Q}/\Delta T$	129
5.6.5. Incerteza da Condutividade Térmica	131
5.7. Comparação dos Resultados de Condutividade Térmica	133
5.8. Determinação do Teor de Água	135
5.9. Análise de Incerteza do Teor de Água	136
5.9.1. Incerteza-Padrão da Resolução do Dispositivo Indicador	137
5.9.2. Incerteza-Padrão do Ajuste de Curva	137
5.9.3. Incerteza-Padrão da Condutividade Térmica	137
5.9.4. Incerteza do Teor de Água	138
5.10. Comparação dos Resultados de Teor de Água	139
 6. Conclusões e Trabalhos Futuros	
6.1. Considerações Finais	141
6.2. Propostas para Trabalhos Futuros	143
 Referências Bibliográficas	144
 Apêndice A	160
Apêndice B	162
Apêndice C	163
Apêndice D	164
Apêndice E	165
Apêndice F	167

Lista de Figuras

Figura 1	Faixa de condutividade térmica de diversos materiais em temperatura ambiente (Çengel, 2003)	32
Figura 2	Variação de condutividade térmica dos materiais com a temperatura (Çengel, 2003)	33
Figura 3	Condutividade térmica reduzida para substâncias monoatômicas em função da pressão e da temperatura reduzida (Bird <i>et al.</i> , 2002)	35
Figura 4	Princípio do método da placa quente protegida. Aparato de duas amostras à esquerda e aparato de amostra única à direita (Czichos <i>et al.</i> , 2006)	46
Figura 5	Diagrama de um equipamento do tipo <i>laser-flash</i> (Czichos <i>et al.</i> , 2006)	48
Figura 6	Sensor do tipo disco quente (Hot Disk AB, 2012)	52
Figura 7	Princípio do fio quente (Czichos <i>et al.</i> , 2006)	54
Figura 8	Diagrama da sonda agulha	57
Figura 9	Karl Fischer coulométrico e volumétrico (Metrohm, 2012)	61
Figura 10	Diagrama da célula de condutividade térmica da ASTM D-2717-95	65
Figura 11	Experimentos de Schmidt e Milverton (Schmidt e Milverton, 1935)	67
Figura 12	Diagrama da sonda de termistores duplo (Zhang <i>et al.</i> , 2003)	75
Figura 13	Condutividade térmica, penetração e temperatura em função do tempo durante a secagem da pasta de cimento (Kubicar <i>et al.</i> , 2005)	76
Figura 14	Tipos de termistor (U. S. Sensor, 2012)	79
Figura 15	Modelo da esfera quente (esquerda) e resposta de temperatura em função do calor dissipado pela esfera (direita) (Kubicar <i>et al.</i> 2008)	80
Figura 16	Influência no processo de medição da resistência térmica na interface entre uma esfera e a água durante o regime transiente (adaptado de Brionizio <i>et al.</i> , 2012)	84
Figura 17	Influência da capacidade térmica da esfera quente no processo de medição	85
Figura 18	Influência da condutância térmica de contato no processo de medição em água durante o regime permanente	86
Figura 19	Influência da condutância térmica de contato no processo de medição em etanol durante o regime permanente	87

Figura 20	Banho termostático	91
Figura 21	Diagrama do dispositivo de medição (Kubicar <i>et al.</i> 2008)	92
Figura 22	Dispositivo de medição (esquerda) e sensores de esfera quente (direita)	92
Figura 23	Termômetros de resistência de platina (esquerda) e indicador digital (direita)	93
Figura 24	Curvas de correção dos termistores	95
Figura 25	Régua padrão e microscópio	96
Figura 26	Multímetro Keithley	97
Figura 27	Multímetro Hewlett Packard	98
Figura 28	Molécula do etanol	100
Figura 29	Frasco com amostra e sensor de esfera quente no interior	101
Figura 30	Frascos no banho termostático sem a tampa	102
Figura 31	Frascos no banho termostático com a tampa	103
Figura 32	Tela do programa de configuração dos equipamentos	104
Figura 33	Monitoramento de temperatura durante um ciclo de medição	105
Figura 34	Diferenças de temperatura nas amostras	117
Figura 35	Raios efetivos dos sensores de esfera quente (água e etanol)	119
Figura 36	Raios efetivos dos sensores de esfera quente (água, etanol e glicerina)	120
Figura 37	Modelo ideal do sensor de esfera quente	122
Figura 38	Modelo do sensor de esfera quente com erros em temperatura (adaptado de Kubicar <i>et al.</i> , 2008)	122
Figura 39	Diagrama causa-efeito das incertezas-padrão de k	127
Figura 40	Diferenças de k em relação à literatura para o item 01	134
Figura 41	Diferenças de k em relação à literatura para o item 02	134
Figura 42	Condutividade térmica em relação ao teor de água	135
Figura 43	Diagrama causa-efeito das incertezas-padrão do teor de água	137

Lista de Tabelas

Tabela 1	Aprimoramento máximo de condutividade térmica de nanofluidos (Adaptado de R <i>et al.</i> , 2012)	38
Tabela 2	Coeficientes da equação de Assael <i>et al.</i> (Adaptado de Assael <i>et al.</i> , 1989b)	43
Tabela 3	Temperaturas, correções e incertezas dos termistores (em °C)	95
Tabela 4	Diâmetros e incertezas dos sensores	96
Tabela 5	Potências, correções e incertezas dos equipamentos (em mW)	99
Tabela 6	Concentração das amostras e incertezas de medição	101
Tabela 7	Números adimensionais para a potência elétrica máxima	106
Tabela 8	Valores de condutividade térmica da água, do etanol e das soluções aquosas de etanol, segundo a literatura (em W/m.°C)	115
Tabela 9	Diferenças de temperatura na potência elétrica selecionada	116
Tabela 10	Condutividades térmicas das amostras calculadas com o raio dimensional (em W/m.°C)	118
Tabela 11	Condutividades térmicas das amostras calculadas com o raio efetivo médio (em W/m.°C)	121
Tabela 12	Razões experimentais $\dot{Q}/\Delta T$ e ξ de cada amostra	124
Tabela 13	Condutividades térmicas das amostras calculadas com o modelo desenvolvido (em W/m.°C)	126
Tabela 14	Condutividade térmica de cada amostra determinada através da literatura e sua respectiva incerteza-padrão (em W/m.°C)	128
Tabela 15	Incerteza-padrão do ajuste de curva da equação de regressão	129
Tabela 16	Incerteza-padrão combinada de $\dot{Q}/\Delta T$	131
Tabela 17	Coeficientes de sensibilidade (experimentais e analíticos) de k em relação à razão $\dot{Q}/\Delta T$ [em (W/m.°C)/(W/°C)]	132
Tabela 18	Incertezas de condutividade térmica das amostras	133
Tabela 19	Condutividades térmicas do etanol PA	136
Tabela 20	Teor de água das soluções aquosas de etanol	136
Tabela 21	Incertezas do teor de água das amostras	138
Tabela 22	Comparação entre as medições do teor de água das amostras do item 01	140

Tabela 23 Comparação entre as medições do teor de água das amostras do item 02

140

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/D	Analógico/digital
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIPM	Bureau International de Poids et Measures
CHERIC	Chemical Engineering Research Information
D/A	Digital/analógico
DIMCI	Diretoria de Metrologia Científica e Industrial do Inmetro
EA	European Cooperation for Accreditation
EIT	Escala Internacional de Temperatura
GUM	Guia para a Expressão da Incerteza de Medição
HTF	Heat Transfer Fluid
IAPWS	International Association for the Properties of Water and Steam
IEC	International Electrotechnical Commission
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	International Organization for Standardization
KDB	Korea Thermophysical Properties Data Bank
LABOR	Laboratório de Análise Orgânica do Inmetro
LAHIG	Laboratório de Higrometria do Inmetro
LAMED	Laboratório de Metrologia Dimensional do Inmetro
LATCE	Laboratório de Tensão e Corrente Elétrica do Inmetro
LATER	Laboratório de Termometria do Inmetro
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NC	Nanotubo de Carbono
NPL	National Physical Laboratory
NTC	Negative Temperature Coefficient
PA	Pró-análise
PID	Proportional Integral Derivative
PMMA	Termoplástico acrílico
PTC	Positive Temperature Coefficient
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloreto de vinila
STN EN	Slovak National Standard in English
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

Lista de Símbolos

A	Área
C	Correção
c	Calor específico
c_i	Derivada parcial ou coeficiente de sensibilidade: $c_i \equiv \partial f / \partial x_i$
c_j	Derivada parcial ou coeficiente de sensibilidade: $c_j \equiv \partial f / \partial x_j$
d	Diâmetro
E_n	Erro normalizado
e	Erro padrão da estimativa
f	Relação funcional
Gr	Número de Grashof
g	Aceleração da gravidade
H	Condutância térmica de contato
I	Corrente elétrica
k	Condutividade térmica
k_L	Condutividade térmica obtida da literatura
l	Comprimento
l_C	Comprimento característico
l_P	Livre percurso médio
m	Massa
Nu	Número de Nusselt
n	Número de observações
P	Potência elétrica
P_A	Potência elétrica ajustada no equipamento
Pr	Número de Prandtl
p	Pressão
p'	Quantidade de parâmetros para estimar a soma dos quadrados devida ao erro $(V_D - V_A)^2$
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor
\dot{q}	Taxa de geração de energia por unidade de volume
q''	Fluxo de calor
R	Resistência térmica de contato
R^2	Coeficiente de determinação
Ra	Número de Rayleigh

R_E	Resistência elétrica
r	Raio
r_C	Coeficiente de correlação
r, φ, z	Coordenadas cilíndricas
r, φ, θ	Coordenadas esféricas
s	Desvio-padrão experimental
T	Temperatura
\bar{T}	Temperatura média
T_F	Temperatura do filme
t	Tempo
U	Incerteza expandida
u	Incerteza-padrão
u_C	Incerteza-padrão combinada
u_i	Componente da incerteza-padrão combinada
V	Tensão
V_A	Valor estimado da variável dependente (valor ajustado)
V_D	Variável dependente
ν_{eff}	Número efetivo de graus de liberdade de $u_c(y)$
ν_i	Número efetivo de graus de liberdade de $u(x_i)$
w	Fração mássica
X_i	I-ésima grandeza de entrada da qual depende o mensurando Y
X_j	J-ésima grandeza de entrada da qual depende o mensurando Y
\bar{x}	Média aritmética de n observações de x_i
x_i	Estimativa da grandeza de entrada X_i
x_j	Estimativa da grandeza de entrada X_j
x, y, z	Coordenadas retangulares
Y	Mensurando
y	Estimativa do mensurando Y

Letras gregas

α	Difusividade térmica
β	Coeficiente de expansão térmica volumétrica
Δ	Diferença
δ_T	Deslocamento de temperatura devido a δ_{TG} e a δ_{TR}

δ_{TG}	Deslocamento de temperatura devido ao gradiente da esfera
δ_{TR}	Deslocamento de temperatura devido à resistência térmica de contato
κ	Fator de abrangência
$\lambda, \lambda_1, \lambda_2$	Coeficientes
μ	Viscosidade dinâmica
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa específica
v	Velocidade molecular média

Subscritos

c	Ponto crítico
e	Esfera
m	Meio
p	Pressão constante
r	Reduzida
ref	Referência
sup	Superfície
v	Volume constante

Sobrescritos

i	Inicial
f	Final