



Daniel Monteiro Pimentel

**Estudo Experimental da Deposição de
Parafina sobre Superfícies Revestidas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC - Rio.

Orientador: Prof. Luis Fernando Alzuir Azevedo

Rio de Janeiro
Dezembro de 2012



Daniel Monteiro Pimentel

**Estudo Experimental da Deposição de
Parafina sobre Superfícies Revestidas**

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

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC - Rio

Dr. Geraldo Afonso Spinelli Martins Ribeiro

PETROBRAS

Dr. Cláudio Marcos Ziglio

PETROBRAS

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC - Rio

Rio de Janeiro, 18 de dezembro de 2012

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

Daniel Monteiro Pimentel

Bacharel em Engenharia Química pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro em 2005.

Ficha Catalográfica

Pimentel, Daniel Monteiro

Estudo experimental da deposição de parafina sobre superfícies revestidas / Daniel Monteiro Pimentel ; orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo. – 2012.
140 f. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.
Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Deposição de parafinas. 3. Revestimentos. I. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

Em primeiro lugar a minha família, sem a qual nada disso seria possível;

Ao meu orientador, professor Luis Fernando, pela paciência, compreensão e apoio ao longo de todo o curso;

A toda a equipe do laboratório de Engenharia de Fluidos, em especial ao Pedro Torres pelos desenhos técnicos, ao Fábio pela ajuda na concepção das peças, ao Luiz Eduardo, à Thayna e à Helena pelo suporte na montagem do experimento e execução dos testes, ao Leonardo pelo apoio nas atividades rotineiras e à Grace pelo apoio logístico no envio das placas para realizar revestimento;

À equipe da Tecnologia de Elevação e Escoamento do CENPES, em especial à Lenise e ao Adriano pela realização dos testes com os fluidos, ao Carlos Dias pela ajuda na confecção das placas de teste e ao Marcelo Gonçalves pelas idéias ao longo do projeto;

Ao Bruno Charles da gerência da Química do CENPES, pela caracterização da parafina;

Ao Professor Sérgio Camargo do departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ e à Patrícia pelo revestimento com carbono amorfo e polimento das placas, além das idéias e opiniões sobre o projeto;

Ao Professor Marcelo Costa do departamento de Física da PUC - Rio, por disponibilizar os equipamentos para caracterização das superfícies;

Aos amigos da gerência de Elevação e Escoamento da Engenharia de Produção da PETROBRAS, pelo apoio, sugestões e incentivo ao longo desta jornada;

Por último, a todos as pessoas que de alguma forma contribuíram, direta ou indiretamente, para a elaboração deste trabalho.

Resumo

Pimentel, Daniel Monteiro; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. **Estudo Experimental da Deposição de Parafina sobre Superfícies Revestidas**. Rio de Janeiro, 2012. 140p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A deposição de parafinas em dutos de produção e coleta é um dos principais problemas de garantia de escoamento na indústria do petróleo. Além das técnicas de prevenção e mitigação tradicionais, o uso de revestimentos internos antiaderentes é uma alternativa ainda em desenvolvimento. Uma extensiva revisão bibliográfica mostrou que muitas das informações disponíveis sobre este assunto baseiam-se em conhecimento de campo e os experimentos desenvolvidos em laboratório apresentam resultados contraditórios. A contribuição deste trabalho foi desenvolver um experimento em laboratório para avaliar a eficiência de superfícies revestidas com relação à prevenção da deposição de parafinas, eliminando o efeito de isolante térmico do mesmo e buscando correlacionar os resultados com as características da superfície como rugosidade, energia crítica e de superfície. O experimento desenvolvido consistia de um loop fechado contendo uma seção de teste em acrílico, com controle de temperatura dos fluidos, medição contínua de fluxo de calor e medição da espessura de depósito através de visualização com câmera. Neste trabalho foram avaliadas as superfícies de aço inox 316L (rugosa e polida), Teflon[®], Nylon 11[®] e carbono amorfo sob a forma de placas retangulares que eram acopladas à seção de teste. Os resultados parecem corroborar as conclusões de alguns estudos da literatura, mostrando que a espessura de depósito de parafina pode ser reduzida pela redução da rugosidade e pela redução da energia crítica e de superfície. A utilização da medida de fluxo de calor como medida indireta da espessura de deposição se mostrou promissora, porém a variação da condutividade térmica do depósito em função do número de Reynolds dificulta sua utilização devido à necessidade de calibração para cada vazão de escoamento.

Palavras-chave

Deposição de Parafina; Revestimentos.

Abstract

Pimentel, Daniel Monteiro; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir (Advisor). **Experimental study of wax deposition on coated surfaces**. Rio de Janeiro, 2012. 140p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Wax deposition is a relevant flow assurance issue for the petroleum industry. Besides the well-known prevention and mitigation techniques for wax deposition, non-stick internal coatings have been proposed as an alternative solution to this problem. A literature review has been carried out and revealed that the available results, based on either field experience and laboratory experiments, are often contradictory. The present work aims at developing a laboratory apparatus to evaluate the influence of coated surfaces on wax deposition. The experiments were carried out at constant heat flux conditions to eliminate the insulation effects that are associated with the different coating. The tests conducted were aimed at establishing a relationship between wax deposition thickness, surface roughness and surface energy. The experiments consisted of a closed loop circuit for the wax solution, employing a transparent test section where plates with different surface coatings were tested. Continuous monitoring of the heat flux removed and fluid and plate temperatures allowed total control of the deposition process. Wax layer thicknesses were measured optically with the aid of a digital camera. Five different surfaces were tested, namely, 316L stainless steel (rough and polished), Teflon[®], Nylon 11[®] and amorphous carbon. A key finding of these experiments is that the lower the surface energy or the smoother the surface, the lower the wax deposit thickness. However, the wax deposit reduction was seen to be highly dependent on flow conditions. As a side result of the experiments, the indirect determination of wax thickness based on heat flux measurements was shown to be a viable technique. Although the thermal conductivity of the wax deposit, a necessary information for the implementation of the technique, seemed to depend on the flow Reynolds number.

Keywords

Wax Deposition; Coatings.

Sumário

1 Introdução	17
2 Revisão Bibliográfica	21
2.1. Parafinas	21
2.2. Mecanismos de deposição de parafina	23
2.3. Adesão	30
2.4. Revestimentos	36
2.4.1. Superfícies Tratadas	43
2.4.2. Revestimentos Plásticos	44
2.5. Equipamentos para teste de deposição de parafina	45
2.6. Técnicas de Medição de espessura de depósito	47
3 Experimentos	51
3.1. Premissas de Projeto	51
3.2. Descrição geral do experimento	52
3.3. Seção de teste de deposição	54
3.3.1. Placas de aço inoxidável	56
3.3.2. Projeto da seção de teste	58
3.3.3. Trocadores de calor	61
3.3.4. Banhos Termostáticos	62
3.3.5. Sistema para visualização do depósito	62
3.3.6. Sistema de aquisição de dados	63
3.3.7. Sistema de manutenção da temperatura de teste	66
3.4. Sensores de fluxo de calor e experimento de calibração	66
3.4.1. Resultados de calibração dos sensores de fluxo	71
3.5. Revestimentos utilizados	75
3.6. Estratégia de aquisição dos dados	76
3.6.1. Temperatura do fluido frio	78
3.6.2. Matriz de Testes	79
3.7. Procedimento Experimental	81
4 Caracterização dos fluidos e das superfícies	83
4.1. Caracterização dos fluidos	83
4.1.1. Análise cromatográfica da solução de parafina	83
4.1.2. TIAC	84
4.1.3. Viscosidade	85
4.1.4. Densidade	85
4.1.5. Calor específico	85
4.1.6. Condutividade Térmica	86
4.1.7. Seleção do fluido termicamente similar à solução de parafina	86
4.2. Caracterização das superfícies	88
4.2.1. Ensaio para determinação da rugosidade	88

4.2.2. Medidas de rugosidade	90
4.2.3. Ensaio para determinação da energia crítica e de superfície	91
4.2.3.1. Ângulos de contato	93
4.2.3.2. Energia crítica	94
4.2.3.3. Energia de superfície	95
5 Resultados e Discussão	98
5.1. Resultados de espessura de depósito	98
5.1.1. Efeito da rugosidade das superfícies na espessura de depósito	102
5.1.2. Efeito do revestimento na espessura de depósito	104
5.1.2.1. Revestimentos plásticos	105
5.1.2.2. Carbono amorfo (DLC)	108
5.2. Condutividade térmica do depósito de parafina	112
6 Conclusões e recomendações	119
6.1. Conclusões	119
6.2. Recomendações para trabalhos futuros	121
7 Referências Bibliográficas	123
A Apêndice – Memória de Cálculo	129
A.1. Curva da bomba	129
A.2. Número de Reynolds	130
A.3. Teor de parafina circulante	131
A.4. Espessura de depósito	132
A.5. Temperatura medida	133
A.6. Fluxo de calor medido	134
B Apêndice – Procedimentos Experimentais	135
B.1. Abertura da seção de teste	135
B.2. Reposicionamento dos sensores	136
B.3. Fechamento da seção de teste	136
B.4. Procedimento para medição de deposição de parafina	137

Lista de figuras

1-1	Exemplos de problemas operacionais em decorrência da deposição de parafina (fonte: PETROBRAS).	18
2-1	Exemplo de moléculas de parafina (fonte: Wade ⁷).	22
2-2	Ponto de fusão dos alcanos lineares em função do número de carbonos (fonte: Wade ⁷).	23
2-3	Trabalho de adesão e trabalho de coesão (fonte: Hansen ²⁶).	31
2-4	Ângulo de contato e equação de Young ²⁶ (fonte: Hansen ²⁶).	32
2-5	Exemplo de gráfico de Zisman para o PTFE (fonte: Hansen ²⁶).	32
2-6	Percentual de redução de parafina versus espessura média de revestimento (milésimo de polegada) – fonte: Effner ³⁷ .	38
2-7	Redução percentual de depósito versus tipo de revestimento (fonte: Effner ³⁷)	38
2-8	Redução de depósito por milésimo de polegada de espessura de revestimento versus tipo de revestimento (fonte: Effner ³⁷)	39
2-9	Diagrama esquemático sobre a influência dos revestimentos na deposição de parafina.	42
2-10	Energia livre de superfície de algumas superfícies (fonte: Paso et al. ³¹).	43
2-11	Representação esquemática de equipamento <i>cold finger</i> com discos removíveis (fonte: Zhang et al. ⁴⁰).	46
2-12	Representação esquemática do dispositivo cilíndrico Couette-Taylor (fonte: Akbarzadeh et al. ⁴³).	46
2-13	Vista isométrica do flow loop utilizado pelo CENPES.	47
3-1	Vista simplificado do experimento montado para o estudo da deposição de parafina.	52
3-2	Visão geral do loop experimental montado para o estudo da deposição de parafina.	53
3-3	Vista isométrica da seção de teste.	54
3-4	Vista lateral da seção de teste.	54
3-5	Vista Explodida da seção de teste: 1- Placa isolante de polipropileno (10 mm); 2- Placa de cortiça (4 mm); 3- Trocador de calor em Polipropileno; 4- Placa lisa de aço inox; 5- Filme de PVC com recorte para encaixe do sensor de fluxo; 6- Placa de aço inox 316 L, com recortes para fixação dos termopares e sensor de fluxo; 7- Seção usinada em acrílico.	55
3-6	Imagem da seção de teste montada no laboratório.	56
3-7	Face superior da placa de aço inox 316L usinada com a região a ser revestida em vermelho.	57
3-8	Face Inferior da placa de aço inox 316L.	57
3-9	Visão detalhada da seção de teste.	59

3-10	Visão detalhada dos difusores de fluxo inseridos na entrada da seção de teste.	60
3-11	Vista da montagem do circuito hidráulico para os experimentos de visualização do escoamento.	60
3-12	Detalhe do experimento de visualização do escoamento na seção de teste mostrando o posicionamento da câmera digital relativa ao plano de luz laser.	61
3-13	Testes de visualização do escoamento com partículas traçadoras e plano de luz laser: a) escoamento no canal quando posicionadas as placas defletoras na entrada; b) escoamento no canal sem as placas defletoras; observa-se a ocorrência de recirculação do escoamento.	61
3-14	Vista Isométrica e superior do sistema de aquisição de imagens.	63
3-15	Tela do programa labview desenvolvido para acompanhamento dos testes.	64
3-16	Vista geral do experimento de calibração dos sensores de fluxo.	68
3-17	Vista geral do experimento incluindo isolamento lateral e dissipação do calor gerado.	68
3-18	Vista explodida da montagem utilizada na calibração dos sensores de fluxo.	69
3-19	Detalhes da montagem do sistema para calibração do sensor de fluxo: a) sem película de PVC e b) com película de PVC. 1- Isolamento térmico em isopor; 2- Placa de aço ultrafina submetida a tensão controlada; 3- Sensor de fluxo padrão; 4- Placa de aço inox 316L lisa; 5- Placa de aço inox 316L usinada com três sensores de fluxo (HFS-4) fixados na superfície; 6- Sensor de fluxo a ser calibrado (HFS-4); 7- Película de PVC.	71
3-20	Resultado da Calibração dos sensores de fluxo de calor sem a utilização de película de PVC entre as placas de aço.	72
3-21	Distribuição de fluxo de calor ao longo da superfície da placa de aço inox com a utilização da película de PVC entre as placas.	73
3-22	Comparação entre o fluxo de calor gerado e o fluxo de calor medido pelo sensor de referência.	73
3-23	Curva de Calibração do sensor de fluxo HFS-4 11021964, conectado na porta 101 da placa de aquisição.	74
3-24	Curva de Calibração do sensor de fluxo HFS-4 11021973, conectado na porta 103 da placa de aquisição.	74
3-25	Estrutura monomérica de: a) Politetrafluoretileno - PTFE (Teflon [®]), b) Poliamida 11 (Nylon 11 [®]). Cada vértice representa um átomo de carbono.	75
3-26	Placas revestidas utilizadas: a) revestimento de carbono amorfo (DLC), b) revestimento de Nylon 11 [®] , c) revestimento de TEFLON [®] , d) placa de aço polida, e) placa de aço convencional.	76

3-27	Imagens do depósito para vazões superiores a 883 L/h, mostrando a formação de sulcos e irregularidade na espessura do depósito.	77
4-1	Gráfico de distribuição de parafinas.	84
4-2	Composição da parafina utilizada (Normal x Ramificada).	84
4-3	Fluxograma simplificado de um perfilômetro mecânico.	89
4-4	Medida de uma superfície rugosa mostrando áreas acima (picos) e abaixo (vales) da linha média.	89
4-5	Imagem do Goniômetro utilizada para as medidas de ângulo de contato.	92
4-6	Gráfico de Zisman para a energia crítica das superfícies analisadas.	95
4-7	Gráfico para determinação da Energia de Superfície.	96
5-1	Exemplos de imagens representativas de depósitos de parafina obtidos sobre as diferentes placas utilizadas durante os experimentos. Imagens como estas eram utilizadas na medição de espessura de depósito.	99
5-2	Variação da espessura de deposição de parafina em função do número de Reynolds, para as diferentes superfícies testadas e indicadas na legenda.	101
5-3	Percentual da espessura de deposição de parafina em função do número de Reynolds, para as diferentes superfícies testadas e indicadas na legenda. A placa de aço convencional foi tomada como referência, ou seja, a espessura de depósito nesta placa corresponde a 100%.	101
5-4	Redução percentual na espessura de depósito em função do número de Reynolds para os diversos revestimentos testados. As espessuras de depósito da placa de aço convencional foram tomadas como referência.	102
5-5	Efeito da rugosidade sobre a espessura de depósito de parafina como função do número de Reynolds. Comparação entre placas de aço inox 316L convencional e polida.	103
5-6	Efeito da rugosidade sobre a espessura de depósito de parafina como função do número de Reynolds. Comparação entre placas de aço inox 316L convencional e polida. Resultados percentuais em relação à placa de aço convencional.	103
5-7	Espessuras de depósito de parafina em função do número de Reynolds para os revestimentos de Teflon, Nylon 11 e para a placa de aço convencional, todos com aproximadamente a mesma rugosidade superficial média.	105
5-8	Espessuras de depósito de parafina, em termos percentuais, em função do número de Reynolds para os revestimentos de Teflon, Nylon 11. Espessuras de depósito sobre a placa de aço convencional tomadas como referência. Todas as superfícies com aproximadamente a mesma rugosidade superficial média.	106

5-9	Espessura de depósito de parafina em função da energia crítica dos revestimentos plásticos para diferentes números de Reynolds. A placa de aço convencional foi tomada como referência.	107
5-10	Espessura de depósito de parafina em função da energia de superfície dos revestimentos plásticos para diferentes números de Reynolds. A placa de aço convencional foi tomada como referência.	107
5-11	Espessuras de depósito de parafina em função do número de Reynolds para o revestimento de carbono amorfo e para a placa de aço polido, ambas com aproximadamente a mesma rugosidade superficial média.	109
5-12	Espessuras de depósito de parafina, em termos percentuais, em função do número de Reynolds para o revestimento de carbono amorfo e de aço polido. Espessuras de depósito sobre a placa de aço convencional tomadas como referência.	109
5-13	Espessura de depósito de parafina em função da energia crítica do revestimento de carbono amorfo e da placa de aço polido para diferentes números de Reynolds. A placa de aço convencional foi tomada como referência.	110
5-14	Espessura de depósito de parafina em função da energia de superfície do revestimento de carbono amorfo e da placa de aço polido para diferentes números de Reynolds. A placa de aço convencional foi tomada como referência.	111
5-15	Resistências térmicas do sistema representadas por uma associação de resistores elétricos, desconsiderando deposição de parafina.	112
5-16	Resistências térmicas à transferência de calor em função do número de Reynolds, desconsiderando a deposição de parafina.	113
5-17	Resistências térmicas do sistema representadas por uma associação de resistores elétricos, incluindo a deposição de parafina.	114
5-18	Resistências Térmicas em função do número de Reynolds, incluindo a resistência da camada de parafina depositada.	114
5-19	Curva de crescimento da espessura de depósito de parafina ao longo do tempo medida visualmente para a placa revestida com carbono amorfo. Cada linha representa uma condição de número de Reynolds diferente.	115
5-20	Curva de fluxo de calor, através da placa revestida com carbono amorfo, ao longo do tempo. Cada linha representa uma condição de número de Reynolds diferente.	116
5-21	Curva de condutividade térmica do depósito de parafina calculada ao longo do tempo para a placa de revestida com carbono amorfo. Cada linha representa uma condição de número de Reynolds diferente.	117

A-1	Curva de calibração da bomba de cavidades progressivas.	129
A-2	Redução do número de Reynolds em função do crescimento do depósito.	131
A-3	Imagem capturada com exemplo de medida de espessura de depósito de parafina	133

Lista de tabelas

3-1	Espessura e condutividade dos materiais utilizados nas placas revestidas.	65
3-2	Especificação do sensor de fluxo HFS-4 da OMEGA®.	70
3-3	Relação entre a frequência de rotação da bomba, número de Reynolds e regime de fluxo.	77
3-4	Temperatura do banho frio e fluxo de calor nas placas revestidas para cada vazão empregada.	79
3-5	Matriz de teste.	80
4-1	Viscosidades das misturas querosene/óleo mineral spindle.	87
4-2	Propriedades Físicas das soluções de parafina 20% e óleo mineral spindle 50% em querosene.	87
4-3	Números adimensionais para as duas soluções comparadas.	88
4-4	Resultados de rugosidade obtidos.	90
4-5	Tensões superficiais dos líquidos utilizados para medida das energias crítica e de superfície das placas testadas.	92
4-6	Imagens das gotas utilizadas para medida do ângulo de contato.	93
4-7	Ângulo de contato médio ($\bar{\theta}$), desvio padrão das medidas (σ) e cosseno do ângulo de contato ($\cos\theta$) das superfícies analisadas.	94
4-8	Resultado de energia crítica das superfícies analisadas.	95
4-9	Dados para traçado dos gráficos de energia de superfície.	96
4-10	Resultados de energia de superfície.	97
4-11	Comparação entre as energias de superfícies calculadas e as encontradas na literatura.	97
5-1	Resultados de espessura de depósito de parafina para diferentes revestimentos e número de Reynolds.	100
5-2	Resultados de espessura de depósito de parafina para diferentes revestimentos e números de Reynolds em termos relativos à placa de aço convencional.	100
B-1	Temperatura do banho termostático a ser ajustada, por vazão da bomba e por placa de teste.	140

Lista de símbolos

Símbolos Romanos

A	área de deposição, m^2
a	coeficiente angular
b	coeficiente linear
c_p	calor específico, $J/kg.K$
C	fração volumétrica de parafina na solução, adimensional
C^*	fração de cristais de parafina na solução, adimensional
C_0	porosidade do depósito de parafina (equação Matzain), adimensional
C_1	coeficiente de correção da difusão molecular, adimensional
C_2	coeficiente de correção de remoção por cisalhamento (equação de Matzain), adimensional
C_3	coeficiente de correção de remoção por cisalhamento (equação de Matzain), adimensional
D_B	coeficiente de difusão Browniana, m^2/s
d_h	diâmetro hidráulico, m
D_m	coeficiente de difusão de parafina líquida no óleo, m^2/s
e	tensão, V
F	força, $kg.m/s^2$
f	fator de atrito de Fanning, adimensional
G	energia livre, J
h	coeficiente de troca térmica convectiva, $W/m^2.K$
k	condutividade térmica, $W/m.K$
k^*	constante de taxa de incorporação de cristais, adimensional
k_p	Condutividade térmica da parafina, $W/m.K$
k_w	Condutividade térmica da parede de aço, $W/m.K$
L	comprimento ou espessura, m
M	peso molecular do óleo, $kg/kmol$
m	massa de parafina depositada, kg
m_b	massa de parafina depositada em razão de difusão browniana, kg
m_m	massa de parafina depositada em razão de difusão molecular, kg
P	perímetro molhado, m
Pr	número de Prandtl, adimensional
Q	vazão volumétrica, m^3/s
q	fluxo de calor, W
q''	fluxo de calor por unidade de área, W/m^2
R	resistência térmica, $m.K/W$
R_a	rugosidade, m
Re	número de Reynolds, adimensional
r	coordenada radial, m
r_i	raio interno, m
r_o	raio externo, m
T	temperatura, K
\bar{T}	temperatura média, $^{\circ}C$
T_b	temperatura de mistura (bulk), $^{\circ}C$

T_w	temperatura da parede, °C
t	tempo, s
W	trabalho, J
W^A	trabalho de adesão, J
W^C	trabalho de coesão, J
V	volume molar do soluto, m ³ /kmol
v	velocidade, m/s

Símbolos Gregos

γ_w	taxa de cisalhamento na parede, s ⁻¹
γ_{crit}	energia crítica, dina/cm
γ_s	energia de superfície, dina/cm
ΔP	Diferencial de pressão, Pa
ΔT	Diferencial de temperatura, °C
δ	espessura de depósito de parafina, m
ε	parâmetro de associação, adimensional
γ	tensão superficial ou energia de superfície, dina/cm
ρ	massa específica, kg/m ³
ρ_d	massa específica da parafina sólida depositada, kg/m ³
θ	ângulo de contato, °
$\bar{\theta}$	ângulo de contato médio, °
μ	viscosidade dinâmica, Pa/s
Φ	parâmetro de interação, adimensional
\varnothing	porosidade de depósito, adimensional
σ	desvio padrão

Subscritos e Sobrescritos

1	refere-se a superfície 1
2	refere-se a superfície 2
12	refere-se a interface 1-2
p	força polar
d	força de dispersão
s	fase sólida
l	fase líquida
<i>aço</i>	aço
<i>coating</i>	revestimento
<i>PVC</i>	película de PVC
<i>interno</i>	meio interno
<i>externo</i>	meio externo
<i>quente</i>	fluido quente
<i>frio</i>	fluido frio
<i>parede</i>	refere-se à parede podendo ser interno ou externo
<i>wax</i>	parafina