

Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Seleção de Revestimentos Orgânicos Anti-incrustantes para Poços de Petróleo
Mônica de Oliveira Penna^a, Felipe Batista Alvim^b, Ana Carolina Helena Gonçalves^c,
Alexander Hiroshi Kasama^d, André Ferreira Lazaro^e

Abstract

Inorganic scale can completely block production lines and damage equipments. The main outcome of these problems are failures in equipments, emergency stops, raise on the maintenance costs and loss of production efficiency. In short, scaling on a oil well or in a flexible line can be looked at as the following process: the produced water enters the pipe in a supersaturated state and flows through the line where the nucleation and further growing of the crystals occur. Currently, scaling problems are being solved through the use of chemical inhibitors and chemical/mechanic removal. New studies are being conducted to evaluate if less adhesive surfaces can be used on key components of the production system, as valves, to prevent the loss of production duo to scaling. The use of nonstick surfaces can reduce drastically the intervention costs if we consider that the installation of smart systems and production stops can easily generate losses of million dollars a day. However, it does not completely eliminate the use of chemical inhibition as prevention. One of the industry greatest problems is to find an anti-scaling coating, possibly with low surface energy, that is able to bear the required conditions of abrasion, temperature, gas permeation, corrosion and chemical resistivity. In this paper will be presented the firsts results of the anti-adherent proprieties evaluation of different coatings that can be applied on well columns.

Keywords: corrosion, coating, adhesion, petroleum.

Resumo

As incrustações salinas podem pluguear linhas de produção e equipamentos e prejudicar o fluxo de fluido produzido. A consequência pode ser a falha de equipamentos de produção, parada de emergência, aumento do custo de manutenção, e o decréscimo completo na eficiência de produção. Em termos simples, incrustação em um poço ou em uma linha flexível pode ser imaginada como o seguinte processo: a água produzida entra na linha em um estado supersaturado e flui através da linha onde ocorre então a nucleação e o crescimento dos cristais, que aumentam de tamanho na direção do fluxo. A maioria das operações para a remoção e prevenção da formação de incrustações tem considerado os métodos de inibição química, removedores químicos e mecânicos. Contudo, novos estudos estão sendo realizados

a Mestre, Química de Petróleo Pleno – PETROBRAS/CENPES

b Técnico Químico Pleno – PETROBRAS/CENPES

c Estagiária - PETROBRAS/CENPES

d Engenheiro de Equipamentos - PETROBRAS/CENPES

e Engenheiro de Equipamentos - PETROBRAS/E&P-ENGP

para avaliar o potencial do emprego de superfícies menos aderentes sobre componentes-chaves do sistema de produção, tais como válvulas e partes do sistema de poços inteligentes para a prevenção de perdas de produção, devido à incrustação. O emprego de superfícies menos aderentes (anti-incrustantes) pode gerar uma redução considerável de custos de intervenções para inibição e controle, por exemplo, em operações de completação inteligente de poços avançados, que custam milhões de dólares para sua instalação, contudo, não elimina integralmente o emprego de produtos químicos inibidores como forma preventiva de ocorrência de incrustação. Um dos maiores desafios para a indústria é encontrar uma superfície anti-incrustante, possivelmente com baixa energia de superfície, que atenda aos requisitos de resistência a abrasão, adesão, resistência térmica, resistência à permeação de gases e resistência química. Neste estudo serão apresentados os primeiros resultados dos ensaios de avaliação das propriedades anti-aderentes de diferentes revestimentos orgânicos e inorgânicos para aplicação em colunas de poços produtores.

Palavras-chave: revestimentos, incrustações, adesão, petróleo

Introdução

O emprego de superfícies anti-incrustantes pode gerar uma redução considerável de custos de intervenções para inibição de depósitos inorgânicos em operações de completação inteligente de poços avançados, que custam milhões de dólares, contudo, não elimina integralmente a necessidade do emprego de produtos químicos inibidores como forma preventiva de ocorrência de incrustação (1). Em geral, os revestimentos com características anti-incrustantes são aqueles preparados com materiais de baixa energia de superfície. A energia de superfície de um sólido ou líquido pode ser considerada como o trabalho requerido para formar uma unidade de área de uma superfície. Foi demonstrado que a adesão de incrustações é reduzida e os tempos de indução são prolongados em sistemas onde há baixa energia de superfície (2,3). Uma análise teórica do comportamento da deposição sobre vários tipos de superfícies é crucial para o desenvolvimento e o emprego de superfícies anti-incrustantes (baixa deposição) (1). Antes de se avaliar o potencial de inibição de deposição de uma dada superfície, várias propriedades de superfícies, tais como adesão, rugosidade, molhabilidade, energia de superfície e a química de superfície devem ser conhecidas e analisadas. Estas propriedades são algumas das forças motrizes do processo de formação de incrustações salinas sobre superfícies. No experimento realizado por Müller-Steinhagen e Zhao a incrustação de sulfato de cálcio sobre uma superfície de aço inox implantada comparada a incrustação a uma superfície não revestida se apresentou menos aderida e mais porosa e pode ser removida mais facilmente (4,5). Contudo, ainda existem poucos casos na indústria de petróleo e gás onde o emprego de superfícies modificadas ou revestimentos foram seriamente considerados para a prevenção de incrustação. O principal desafio para a indústria de petróleo e gás é encontrar uma superfície anti-incrustante, possivelmente com baixa energia de superfície, que atenda aos requisitos de resistência a abrasão, adesão, resistência térmica, resistência à permeação de gases e resistência química. Assim, com o objetivo de selecionar revestimentos com características anti-incrustantes para aplicação em poços de produção de petróleo, em reservatórios com elevado potencial de incrustação para carbonatos e sulfatos, realizaram-se ensaios de deposição pelo método do corpo de prova rotatório utilizando-se uma composição típica de água produzida.

Procedimento Experimental

1. Materiais e Métodos

A seguir, estão apresentadas as descrições da composição da água produzida sintética utilizada nos ensaios, dos materiais e revestimentos avaliados, dos procedimentos analíticos utilizados na caracterização e quantificação dos depósitos formados e do procedimento utilizado para cálculo do grau de adesão em cada amostra analisada (% de área aderida).

1.1. Composição da Água Produzida Sintética Utilizada nos Ensaio

A água produzida salina utilizada nos ensaios foi composta pela mistura (1:1) de duas soluções salinas, uma solução preparada com os sais dos cátions precipitantes e a outra com os sais dos ânions. As composições das soluções de cátions e ânions e da mistura/água produzida composta encontram-se na tabela 1.

Tabela 1 - Composições das soluções de cátions e ânions e da mistura/água produzida.

Composição	Solução de Cátions (mg/L)	Solução de Ânions (mg/L)	Água produzida sintética (mg/L)
Na ⁺	71131,0	90890,0	71131,0
K ⁺	4938,0	-	2469,0
Mg ⁺²	3356,0	-	1678,0
Ca ⁺²	23082,0	-	11541,0
Ba ⁺²	314,0	-	157,0
Sr ⁺²	5372,0	-	2686,0
Cl ⁻	169298,0	138327,0	138400,0
Br ⁻	-	2048,0	1024,0
CH ₃ COO ⁻	-	28,0	14,0
SO ₄ ⁻²	-	1124,0	562,0
HCO ₃ ⁻	-	116,0	58,0
pH (25°C)			6,7
NaCl			228370,0

1.2. Amostras Avaliadas

O emprego de resinas NOVOLAC e resinas fenólicas em poços de petróleo vêm sendo feito com maior frequência, devido principalmente a resistência à corrosão destes revestimentos.

Assim, neste estudo três revestimentos à base de resina epóxi (NOVOLAC e Epóxi fenólico) foram selecionados para os ensaios de adesão, isto é, avaliação de suas características anti-incrustantes. Além destes revestimentos foram incluídos revestimentos à base de PTFE e Flúor polímeros, que possuem comprovado caráter anti-incrustante.

Os corpos de prova revestidos foram preparados pelos próprios fabricantes. Os mesmos foram preparados sobre as superfícies de corpos de prova cilíndricos de aço inox 316 com 12,7 mm de diâmetro e 20 mm de altura (figura 1). As superfícies dos corpos de prova de aço 316 foram previamente preparadas por meio de polimento e limpeza final. O polimento das superfícies dos corpos de prova foi realizado gradualmente em politriz automática, com acabamento de 800 mesh e, por fim, polimento com pasta de diamante de 1 μm . Para atingir o acabamento de 800 mesh foi utilizada uma seqüência de lixas comerciais com as seguintes granulometrias: 120, 320, 500 e 800 mesh. A orientação da superfície metálica foi mantida fixa durante a utilização de cada lixa; No momento da troca de lixa a direção da amostra é girada em 90° graus. A força normal aplicada sobre a amostra foi de 15 N. O tempo de lixamento para cada granulometria foi de 5 minutos.

Para atingir o acabamento final, a superfície foi polida com o auxílio de pano de polimento e pasta de diamante de 1 μm . Após o polimento, evitou-se todo contato manual com o corpo de prova, sendo este manuseado exclusivamente por meio de pinça. A limpeza final é realizada com álcool etílico, em ultrassom por 10 minutos. Em seguida, os corpos de prova foram secos por meio de jateamento de ar pressurizado paralelo à sua superfície e são mantidos em dessecador até o momento da preparação do revestimento pelo fabricante ou até a realização do ensaio controle. Cada fabricante realizou um procedimento específico para a confecção dos corpos de prova revestidos, os quais não foram descritos.



Figura 1 - Corpo de Prova de aço inox polido.

As composições dos revestimentos avaliados estão apresentadas na tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Composições dos revestimentos avaliados.

Amostra	Composição	Foto do Corpo de prova revestido
Revestimento 1	Resina de copolímero perfluoro-alcóxi.	

Revestimento 2	Etileno-tetrafluoretileno modificado (politetrafluoretileno (PTFE) modificado).	
Revestimento 3	“Fusion Bonded Epoxy” – FBE – Epóxi NOVOLAC - pó.	
Revestimento 4	“Fusion Bonded Epoxy” – FBE – Epóxi NOVOLAC - pó.	
Revestimento 5	Epóxi fenólico – Líquido.	

Com o objetivo de avaliar o impacto do lixamento (polimento) na adesão de incrustações salinas sobre o material não revestido realizou-se ensaios com corpos de prova de três fases de polimento, isto é, 120, 320 e 800 mesh. e foram denominados de ensaios Controles 1, 2 e 3 (tabela 3). Os resultados do Controle 3, o mais polido, foram comparados também aos resultados dos revestimentos.

Tabela 3 – Características do acabamento dos corpos de prova utilizados nos ensaios controles.

Ensaio	Material	Acabamento
Controle 1	Aço Inox 316	Lixamento - 120 mesh e polimento.
Controle 2	Aço Inox 316	Lixamento - 320 mesh e polimento.
Controle 3	Aço Inox 316	Lixamento - 800 mesh e polimento

1.3. Procedimentos Analíticos

a) Rugosidade

As análises de rugosidade dos corpos de prova revestidos foram realizadas no rugosímetro Mitutoyo Surftest 402, conforme a norma técnica DIN EN ISO 4288:1998. O padrão de

rugosidade média aritmética (R_a) igual foi de 2,95 μm e de rugosidade máxima (R_{max} (R_y)) foi de 9,5 μm .

b) Ângulo de Contato

As medidas de ângulo de contato dos novos revestimentos foram feitas em placas planas, com o tensiômetro Attention Theta (BiolinScientific). As amostras foram limpas com etanol e enxaguadas com água deionizada e ultrasonizadas por 5 min em água deionizada. Os líquidos e os respectivos volumes médios de gota utilizados foram água (5,5 μL), glicerina (4,4 μL) e etileno glicol (7,0 μL). Foi utilizada uma seringa Hamilton (1 mL) com uma agulha de aço inox ($\phi=0,72$ mm; $i\phi=0,21$ mm). Estas análises foram realizadas pela UNICAMP/Instituto de Química.

c) Energia Crítica de Superfície

A Energia Crítica de Superfície (ECS) caracteriza a molhabilidade de uma superfície por vários líquidos. Sólidos que apresentam uma energia de superfície crítica alta são molháveis pela maioria dos líquidos, enquanto sólidos que possuem uma energia crítica de superfície baixa não são molháveis a maioria dos líquidos.

A determinação padrão deste parâmetro é feita a partir dos ângulos de contato obtidos para pelo menos três líquidos. Um gráfico é feito onde a tensão superficial (γ) dos líquidos é a variável do eixo X, e o coseno do ângulo de contato (θ) correspondente é a grandeza do eixo Y. A extrapolação da curva $\cos \theta$ vs θ para $\cos \theta = 1$ (o que corresponde a um ângulo de contato $\theta = 0$, ou molhabilidade completa) dará o valor da energia de superfície crítica do material sob teste.

O valor encontrado para um dado material se refere à tensão superficial máxima que um líquido deve ter para molhar totalmente aquela superfície. Os valores de tensão superficial utilizados foram: γ água = 72,8 mNm^{-1} ; γ glicol = 63,1 mNm^{-1} ; γ etileno glicol = 48,0 mNm^{-1} . Estas análises foram realizadas pela UNICAMP/Instituto de Química.

d) Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de Energia Dispersiva (MEV/EDS)

As análises de MEV/EDS foram realizadas nos corpos de prova de aço inox 316 dos ensaios controles (Controle 1-3) e nos corpos de prova revestidos (Revestimento 1-5) antes e após cada ensaio. O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura Tabletop Microscope TM 3000, da HITACHI.

As análises da composição elementar por EDS foram realizadas utilizando o sistema SwiftED 3000 X-Ray Microanalysis. As análises foram realizadas após a secagem dos corpos de prova a 50 °C, por 4 horas, em estufa de secagem. As análises de EDS foram obtidas em um aumento de 40 X e as micrografias foram feitas em aumentos variados (40X, 100X, 500X, 1000X e 1500X). Não foi necessária a metalização das amostras.

e) Densidade de Massa Aderida

As densidades de massas de incrustações aderidas às superfícies (base sem furo) dos corpos de prova foram obtidas com a pesagem em balança analítica (CP 224S, Sartorius). Antes da pesagem os corpos de prova são secos em estufa a 50 °C por 4 h e têm suas paredes limpas (área externa) por remoção mecânica ou passagem por ácido nítrico a 2%, dependendo do grau de incrustação.

A densidade de massa aderida obtida corresponde somente à massa aderida à base do corpo de prova que não tem o furo de conexão com a haste do rotor, isto é, sem considerar a face lateral e a base superior com o furo. A área total exposta foi calculada após a medição de cada corpo de prova antes de cada ensaio. A medida foi realizada com o Axio Imager.M2m com drive Z motorizado, da Zeiss.

f) Microscopia Ótica de Varredura (% de Área Aderida)

Os resultados do percentual de área aderida das amostras dos ensaios controles foram obtidos a partir do processamento das imagens de microscopia ótica (microscópio Axio Imager.M2m com drive Z motorizado, da Zeiss) com o emprego do Software Axiovision Rel. 4.8.2. As análises foram obtidas nas imagens com aumento de 50X.

2. Avaliação do Potencial Anti-incrustante das Amostras

A avaliação do caráter anti-incrustantes de superfícies deve passar pela aplicação de um procedimento analítico que permita a ocorrência de nucleação e crescimento de cristais (incrustações) sobre a superfície do corpo de prova ser avaliada. Na maioria dos ensaios empregados, o depósito é gerado na superfície de corpos metálicos de aço ou corpos de prova revestidos com o revestimento a ser avaliado e imersos em soluções saturadas dos sais incrustantes. Estes corpos de prova podem estar acoplados a um sistema de rotação controlada, de modo que se possa estudar a influência da taxa de cisalhamento e do regime de fluxo na formação do depósito. Este procedimento analítico é comumente chamado de corpo de prova rotatório (6).

Os ensaios de adesão foram realizados em dois sistemas similares, conforme a figura 2. O corpo de prova da amostra a ser analisada foi rosqueado ao suporte do rotor, IKA Werke Digital, EUROSTAR. Os corpos de prova foram totalmente imersos no vaso reacional termostatizado contendo a água produzida sintética (tabela 1). O vaso reacional foi devidamente vedado para evitar a evaporação do fluido. O rotor foi ajustado para a rotação de 500 rpm. O sistema foi conectado a um banho termostatizado acoplado ao banho-maria LAUDA E200 – Ecoline Star Edition. A temperatura de ensaio foi de 56 °C. Os ensaios foram realizados em duplicatas e o tempo de ensaio foi de 24 h. Ao final do ensaio, os corpos de prova foram lavados com água deionizada e desacoplados do rotor. A seguir, os mesmos foram submetidos aos procedimentos analíticos descritos no item 1, acima.



Figura 2 - Aparato utilizado no procedimento de avaliação da adesão de incrustações salinas – corpo de prova rotatório.

Resultados e discussão

Os resultados da fase de caracterização das amostras avaliadas estão apresentados e discutidos a seguir.

Na figura 3 pode-se verificar que as amostras de corpos de prova do Revestimento 1 e Revestimento 2 possuíam níveis de rugosidade mínima inferiores ao aço inox polido (800 mesh), enquanto as amostras dos Revestimentos 3, 4 e 5 apresentavam níveis de rugosidade superiores ao aço inox polido. Particularmente, a amostra do Revestimento 4 foi a que apresentou os maiores níveis de rugosidade mínima e máxima.

Verifica-se, assim, que as amostras de corpos de prova revestidas com os revestimentos a base de FBE (NOVOLAC) e Epóxi fenólico apresentavam níveis de rugosidade superiores aos corpos de prova revestidos com Resina de copolímero perfluoro-alcóxi e de politetrafluoretileno (PTFE) modificado.

Os resultados das análises de ângulos de contato das amostras (tabela 4 e figura 4) confirmam que o grau de molhabilidade à água, glicerol e etileno glicol são menores para as amostras do Revestimento 1 e 2, pois quanto maior é o ângulo de contato menor é a molhabilidade.

As análises das curvas de ângulo de contato obtidas confirmaram que as amostras de FBE e de epóxi fenólico (Revestimentos 3, 4 e 5) são as que apresentam maiores energias críticas de superfície. Assim, verifica-se que as amostras dos Revestimentos 1 e 2 e o aço inox polido

(800 mesh) são as que aparentemente possuem melhor caráter anti-incrustante (anti-aderente) (figura 5).

As análises de MEV/EDS das superfícies (tabela 5) das amostras, antes da realização dos ensaios, confirmaram as composições descritas na tabela 2, que foram previamente fornecidas pelos fabricantes.

As micrografias obtidas a partir das amostras após os ensaios (tabela 6) confirmam a ocorrência de incrustações aderidas às superfícies. Os resultados das análises de EDS confirmaram a presença de estrôncio, cálcio e bário sobre as superfícies analisadas. As principais formas observadas em todas as imagens (aumento de 1500 X) foram de carbonato de cálcio (forma de amêndoas) e carbonato de estrôncio (estrutura em cacho).

A avaliação por microscopia ótica do % de área aderida, por processamento de imagem, foi empregada para a avaliação do efeito do polimento do aço inox 316 (Controles 1, 2 e 3) sobre a adesão de incrustação. Na figura 6 observa-se que o % de área aderida diminui com o aumento do grau de polimento. No ensaio Controle 1, com polimento com lixa de 120 mesh, foi possível verificar a adesão em mais do que 70% da área do corpo de prova, enquanto que para a amostra do controle 3 observou-se aproximadamente 50% de adesão, demonstrando que redução da rugosidade da amostra leva a uma redução significativa de adesão de incrustação.

O caráter anti-incrustante das amostras de revestimentos foi determinado pelo cálculo de densidade de massa aderida. Os resultados da amostra do Controle 3 (Aço Inox 316 – 800) mesh foram utilizados para efeito comparativo. Os resultados de densidade de massa aderida (figura 7) demonstraram que os Revestimentos 1, 2 e 3 foram os revestimentos que apresentaram melhor caráter anti-incrustante. Os Revestimentos 4 e 5 foram os que apresentaram os piores resultados. Comparativamente ao ensaio controle (aço inox 316 polido – 800 mesh), pode-se afirmar que os resultados dos Revestimentos 1, 2 e 3, apresentaram valores aproximadamente quatro vezes maiores do que o Controle 3, o Revestimento 4 apresentou um resultado aproximadamente sete vezes maior e o Revestimento 5 aproximadamente nove vezes maior.

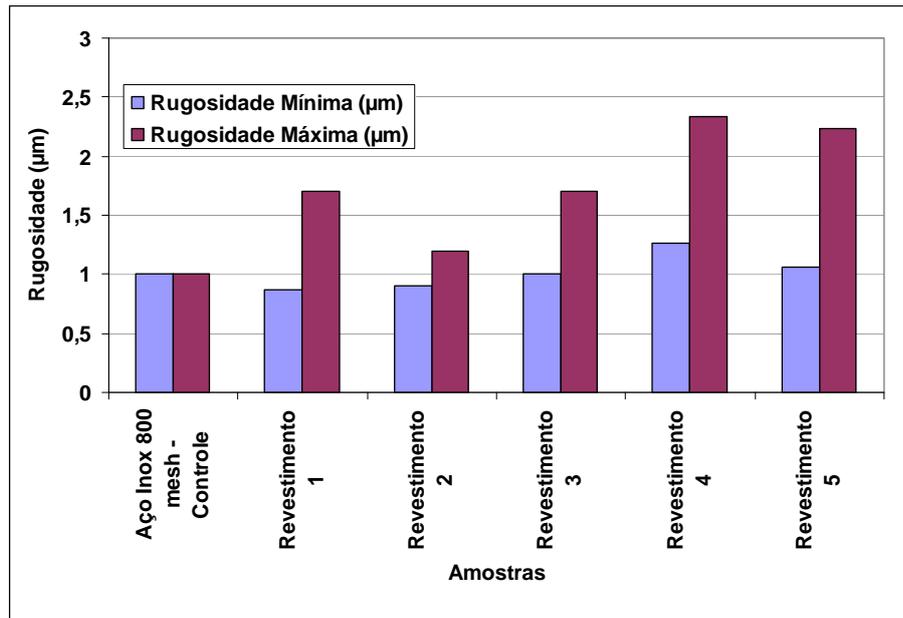


Figura 3 – Rugosidades mínimas e máximas das amostras analisadas.

Tabela 4 – Resultados das análises de ângulo de contato e energia crítica de superfície das amostras de revestimentos e do aço inox com polimento de 800 mesh (Controle 3).

Amostras	Ângulo de Contato – Água (θ)	Ângulo de Contato – Glicerol (θ)	Ângulo de Contato – Etileno Glicol (θ)	Energia Crítica de Superfície (mN/m).
Aço inox – 800 mesh	90,34	86,05	63,73	16,71
Revestimento 1	109,25	99,40	84,02	0
Revestimento 2	103,66	96,19	75,58	9,41
Revestimento 3	80,20	71,52	54,75	22,50
Revestimento 4	89,59	80,25	62,50	18,54
Revestimento 5	85,77	73,16	59,51	19,79

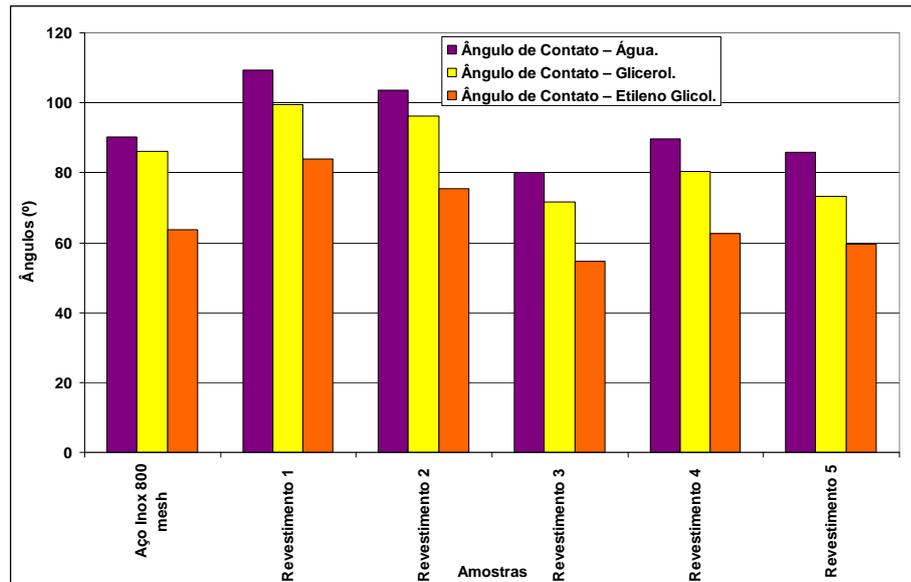


Figura 4 – Ângulos de contato das amostras analisadas.

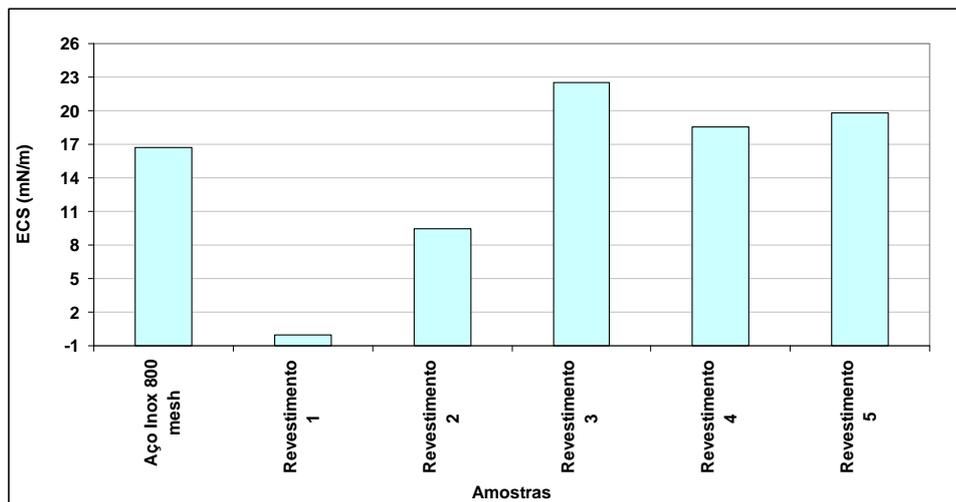
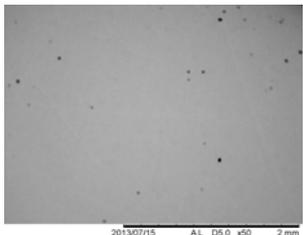


Figura 5 - Energias Críticas de Superfície (ECS) das amostras analisadas.

Tabela 5 – Caracterização por MEV/EDS das superfícies das amostras antes da realização dos ensaios.

Amostras	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - Aum.: 40X.	Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) - Composição (% atômico).
Aço Inox – 800 mesh (Controle 3)		Carbono: 9,298% Silício: 1,035% Cromo: 16,317% Manganês: 1,352% Ferro: 61,622% Níquel: 9,088% Molibdênio: 1,288%

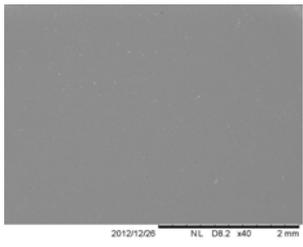
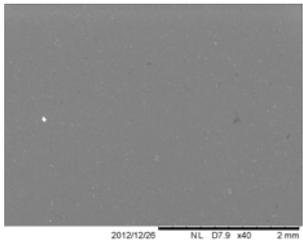
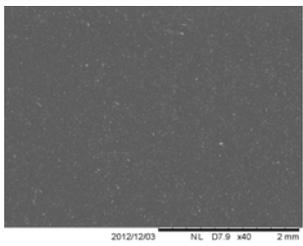
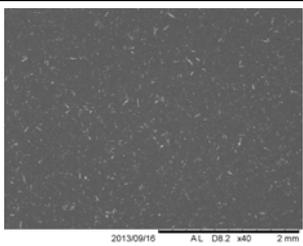
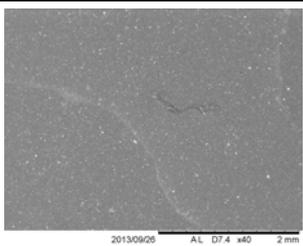
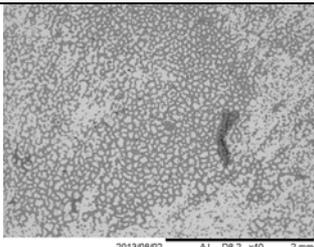
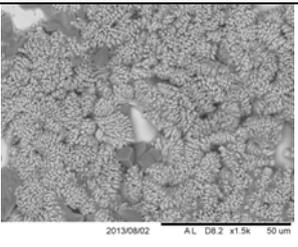
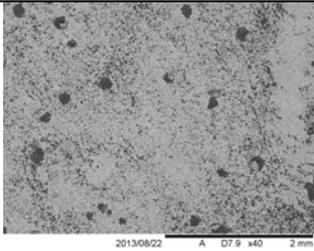
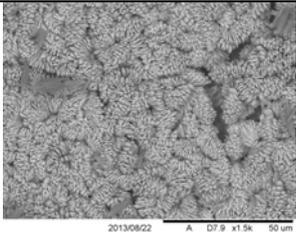
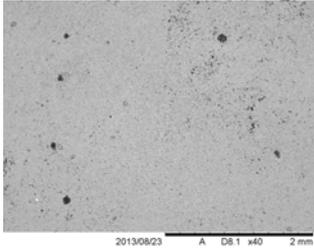
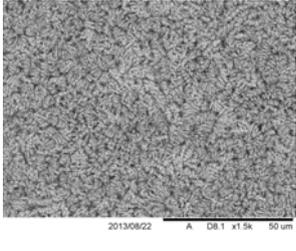
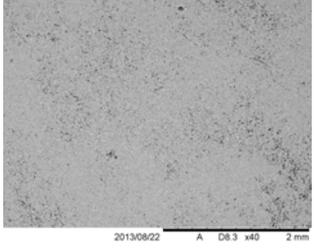
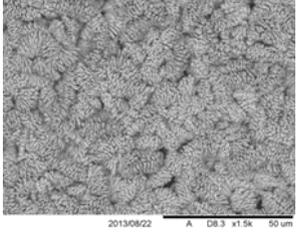
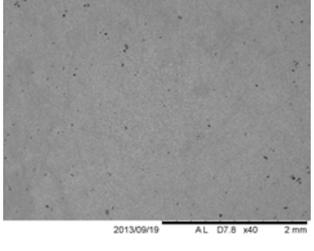
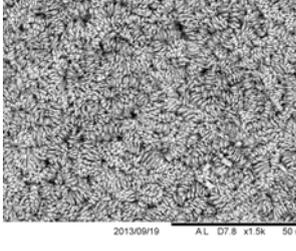
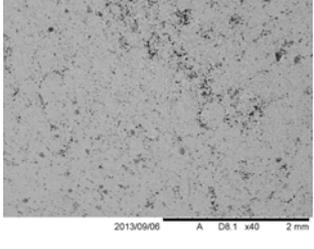
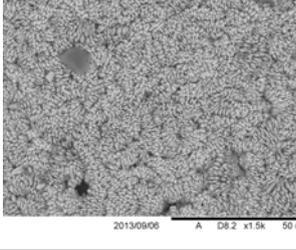
Revestimento 1		Carbono: 24,223% Flúor: 75,777%
Revestimento 2		Carbono: 50,205% Flúor: 49,662% Cloro: 0,133%
Revestimento 3		Oxigênio: 81,009% Silício: 10,070% Cloro: 2,599% Potássio: 0,477% Cálcio: 4,039% Titânio: 1,836%
Revestimento 4		Oxigênio: 67,542% Sódio: 1,322% Silício: 24,626% Cloro: 2,120% Cálcio: 2,292% Titânio: 2,099%
Revestimento 5		Oxigênio: 66,544% Sódio: 2,816% Alumínio: 5,915% Silício: 17,533% Cloro: 2,529% Potássio: 1,393% Titânio: 3,272%

Tabela 6 – Caracterização por MEV/EDS das superfícies das amostras após a realização dos ensaios.

Amostra	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)		Composição (EDS) (% atômico)
	Aum.: 40X	Aum.: 1500 X	
Controle 3 – Aço Inox 800 mesh.			Oxigênio: 46,745% Neon: 1,626% Enxofre: 12,241% Cálcio: 1,032% Cromo: 4,656% Ferro: 16,767% Níquel: 2,573% Estrôncio: 11,886%

Revestimento 1			Bário: 2,474% Oxigênio: 45,446% Flúor: 27,881% Sódio: 0,510% Enxofre: 11,175% Cloro: 0,452% Cálcio: 1,704% Estrôncio: 10,277% Bário: 2,554%
Revestimento 2			Oxigênio: 62,922% Sódio: 1,783% Enxofre: 14,619% Cloro: 2,762% Potássio: 1,228% Cálcio: 1,309% Estrôncio: 14,143% Bário: 1,234%
Revestimento 3			Oxigênio: 65,362% Sódio: 0,415% Enxofre: 15,648% Cálcio: 1,173% Estrôncio: 13,496% Bário: 3,906%
Revestimento 4			Oxigênio: 63,234% Sódio: 0,479% Enxofre: 16,479% Cloro: 0,638% Cálcio: 1,034% Estrôncio: 14,548% Bário: 3,587%
Revestimento 5			Carbono: 18,801% Oxigênio: 54,209% Enxofre: 11,913% Cálcio: 1,662% Estrôncio: 10,659% Bário: 2,757%

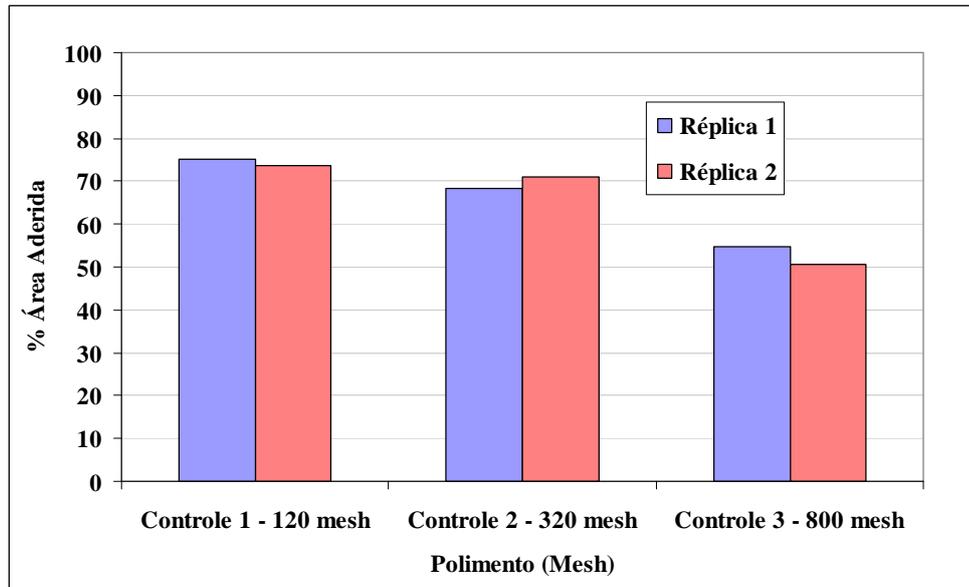


Figura 6 – Percentual (%) de área aderida por amostra analisada.

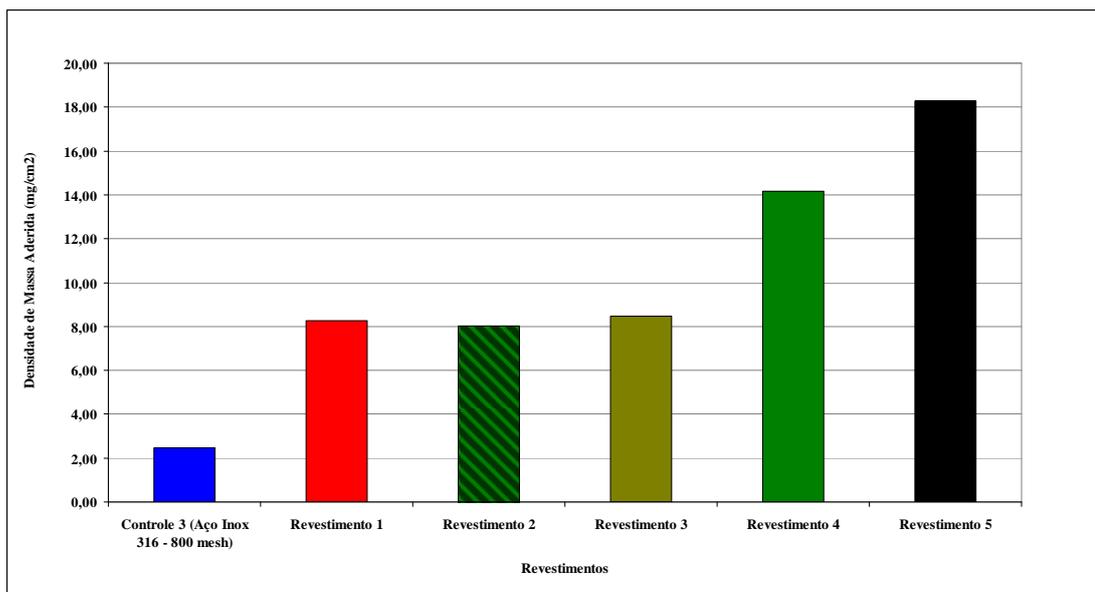


Figura 7 – Densidade de massa aderida por amostra analisada.

Conclusões

Os revestimentos mais aderentes foram aqueles que apresentaram maiores rugosidades e maiores níveis de energias críticas de superfície, isto é, os Revestimentos 5 e 4, a base de epóxi fenólico e epóxi NOVOLAC, respectivamente.

Os resultados obtidos nos ensaios controles com corpos de prova de aço inox com diferentes níveis de polimento confirmam que a rugosidade da amostra é um dos principais parâmetros para a determinação da característica anti-incrustante de materiais e revestimentos aplicados

em poços produtores de petróleo.

As amostras de revestimentos que apresentaram melhores características anti-incrustantes foram o Revestimento 1 (Resina de copolímero perfluoro-alcóxi.) e o Revestimento 2 (politetrafluoretileno (PTFE) modificado).

O Revestimento 3, apesar de apresentar o maior nível de energia crítica, apresentou um bom caráter anti-incrustante, isto é, baixa densidade de massa aderida. Este fato deve estar relacionado com os valores de rugosidade observados nas amostras, visto que o mesmo foi, entre os revestimentos à base de resina epóxi (NOVOLAC e epóxi fenólico) o que apresentou os menores valores de rugosidades mínimas e máximas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Prof. Celso Aparecido Bertran e Profa. Maria de Fátima B. Sousa Sundin pelas importantes informações técnicas trocadas durante o desenvolvimento deste estudo e, também, pela realização das análises de ângulo de contato e energia crítica de superfície das amostras de revestimentos e ao Técnico de Projetos Construção e Montagem Jr. Felipe dos Santos Bastos, do CENPES/PDEP/TMEC, pela realização das análises de rugosidade.

Referências bibliográficas

- (1) COLLINS, I. R.. A new model for mineral scale adhesion. **Society of Petroleum Engineers, SPE, BP Exploration Operating Company**, SPE 74655. January, 2002.
- (2) LUNDAGER MADSEN, H.E., Theory of long induction periods. **Journal of Crystal Growth**, **80**(2): p. 371-377. 1987.
- (3) KIM, W.T. AND Y.I. CHO, Experimental study of the crystal growth behavior of CaCO₃ fouling using a microscope. **Experimental Heat Transfer**, 13: p. 153-161. 2000.
- (4) MYERSON, A.S., **Handbook of Industrial Crystallization**. Butterworth-Heinemann. 2001.
- (5) DAWE, R.A. AND Y. ZHANG, Kinetics of calcium carbonate scaling using observations from glass micromodels. **Journal of Petroleum Science and Technology**, 18: p. 179-187. 1997.
- (6) Procedimento Cooperativo **PETROBRAS/CENPES PE-4CC-00531-A**: Determinação da Eficiência de Revestimentos Antiaderentes Utilizando o Teste do Corpo de Prova Rotativo (2013).