

## QUALIFICAÇÃO DE TELAS PREMIUM PRODUZIDAS NO BRASIL<sup>1</sup>

Marcio Jose Rosales<sup>2</sup>

Osmar Bagnato<sup>3</sup>

Samuel Tocalino<sup>4</sup>

Andrea Achoa<sup>5</sup>

Sigurd Erlandsen<sup>6</sup>

### Resumo

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) disponibiliza instalações voltadas à produção de ciência e tecnologia. O LNLS é operado pelo Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) com recursos do Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação (MCTI) e desenvolve projetos em parceria com a iniciativa privada. Dentro do projeto de Qualificação de Telas Premium produzidas no Brasil, inédito e que proporciona o desenvolvimento de uma nova tecnologia para indústria nacional em parceria com a Adest e Statoil, foram construídos protótipos de Tela Premium a partir do processo de soldagem por difusão em ligas de aço inoxidável AISI 316L para produzir o elemento filtrante, principal componente da Tela Premium. Diversos ensaios foram realizados para qualificar o produto em termos de propriedades mecânicas e comportamento em diversas condições que simulam as de operação dentro de um poço de petróleo. Além de esforços mecânicos de tração, torção, arrancamento, dobramento e esmagamento, também foram conduzidos ensaios de corrosão e corrosão associado ao fenômeno de erosão, com o objetivo de determinar a vida útil do componente em operação. Os resultados mostram que o processo de soldagem por difusão atende de forma satisfatória às exigências da indústria da petroleira no que se refere à capacidade de retenção de areia e a robustez dos componentes soldados.

**Palavras-chave:** Tela *premium*; Petróleo; Ensaios mecânicos; Corrosão; Simulação numérica; Qualificação.

### QUALIFICATION OF PREMIUM SAND SCREENS PRODUCED IN BRAZIL

#### Abstract

The National Synchrotron Light Laboratory (LNLS) provides facilities focused to produce science and technology. LNLS is operated by National Center for Research in Energy and Materials (CNPEM) using resources from Ministry of Science, Technology and Innovation and projects in partnership with private sector. The project is unprecedented and provides the development of a new technology to the national industry in partnership with Adest and Statoil. The prototypes were assembled using diffusion bonding process and stainless steel AISI 316L to produce the filtration element, the main component of the product. Several tests were conducted to characterize the screen in terms of mechanical properties and behavior under varying conditions that simulates the operation within an oil well. Besides efforts on mechanical tensile, torsion, should push off, bending and crushing tests there were also conducted corrosion and corrosion associated with erosion tests, aiming to determine the lifetime of the component in operation. The results show that the diffusion bonding process was satisfactorily accomplished and meets the requirements of the oil industry regarding the capability of sand control and strength of welded components.

**Key words:** Premium sand screen; Petroleum; Mechanical testing; Corrosion; Numerical simulation; Qualification.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro de materiais. Pesquisador. LNLS (Laboratório Nacional de Luz Síncrotron), Campinas, SP, Brasil.*

<sup>3</sup> *Engenheiro de materiais. Líder do Grupo de Materiais – LNLS. Campinas, SP, Brasil.*

<sup>4</sup> *Engenheiro Químico. Diretor Técnico. Adest, Campinas, SP, Brasil.*

<sup>5</sup> *Engenheira geóloga. Technology Manager, Statoil Brasil, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

<sup>6</sup> *Engenheiro de petróleo. Head of Advanced Wells and Production Optimisation, Statoil ASA, Porsgrunn, Noruega.*

O Laboratório Nacional de Luz Sincrotron, administrado e operado pelo Centro Nacional de Tecnologia em Energia e Materiais (CNPEM), detém a tecnologia de soldagem por difusão (*Diffusion Bonding*) para produção de partes e componentes do acelerador de elétrons. A partir do uso do conceito de soldagem por difusão foi desenvolvido novo equipamento com aplicação para indústria do petróleo, mais especificamente para produção de Telas Premium, que é uma ferramenta de fundo de poço responsável pelo controle de areia e separação das impurezas na operação de extração do petróleo. Para produção do elemento filtrante, principal componente da Tela Premium, foi desenvolvido o processo de soldagem por difusão a partir do uso de ligas em formato de tecido metálico. Na fase inicial, o projeto foi financiado pela Finep (Financiadora de Estudos e Projetos), utilizando o Fundo Setorial CT-Petro e pela FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo). O projeto atual, parceria entre o CPNEM e as empresas Statoil e Adest, é inédito no país e promove a inserção de uma nova tecnologia no setor industrial e é protegido pelo acordo de transferência de tecnologia firmado entre o CNPEM e a Adest, registrado no INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial).

A soldagem por difusão promove a formação de uma interface uniforme entre dois materiais.<sup>(1,2)</sup> O processo é conduzido em elevada temperatura, porém, abaixo da temperatura de fusão dos materiais. Tipicamente, usa-se até 90% da temperatura de fusão do material para garantir a mobilidade atômica dentro da estrutura cristalina formando, assim, a união metalúrgica entre as partes. As reações no estado sólido ocorrem em função do tempo e temperatura. Dentre os parâmetros de processo, destacam-se a atmosfera controlada, para evitar a oxidação da superfície e a carga (pressão) aplicada para garantir o contato íntimo dos materiais.<sup>(3-5)</sup>

Mais de 80% de todo o petróleo produzido no Brasil tem origem em reservatórios arenosos que exigem, em sua maioria, operações de completação destinadas a evitar que partículas sólidas e impurezas sejam produzidas. Deste modo, o controle deve ser realizado para impedir que estas partículas causem danos às instalações de superfície, e se acumulem em vasos de separação.<sup>(6)</sup> Limpar a areia em uma etapa posterior a de extração pode ser um trabalho excessivamente caro e conduzir a uma acentuada redução na produção de hidrocarbonetos. Em casos extremos, pode inclusive causar a sua interrupção. Além disso, a eliminação destes sólidos pode ser cara e complicada, ainda mais quando considerado em ambiente marinho.

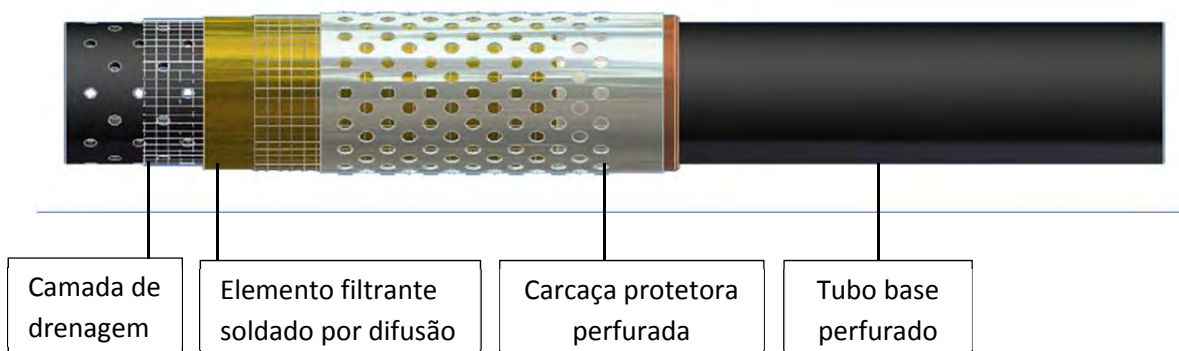
Nestes reservatórios, as forças de coesão que ligam os grãos de areia e constituem a estrutura de formação não são suficientemente fortes para mantê-los estáveis nos níveis aceitáveis de produção. Assim, esses grãos são deslocados e transportados dos fluidos produzidos em um fenômeno fortemente favorecido por elevadas taxas de produção e de óleos pesados. Portanto, a principal função da Tela Premium é garantir o controle de areia e de partículas sólidas indesejadas durante a extração do petróleo, deixando os grãos fora da etapa de completação do poço. A Tela consiste de três componentes principais: o tubo base perfurado, o elemento filtrante, soldado por difusão e, a carcaça protetora. A produção do elemento filtrante é o principal gargalo tecnológico para construção do produto, sendo atualmente comercializado apenas por empresas estrangeiras. A solda por difusão é o processo pelo qual se une os diversos tecidos metálicos que compõem o elemento filtrante.

Nesse sentido, este projeto tem como objetivo demonstrar o trajeto de nacionalização da produção de Telas Premium no Brasil e qualificar o produto em

termos de propriedades mecânicas e comportamento em diversas condições que simulam as de operação dentro de um poço de petróleo.

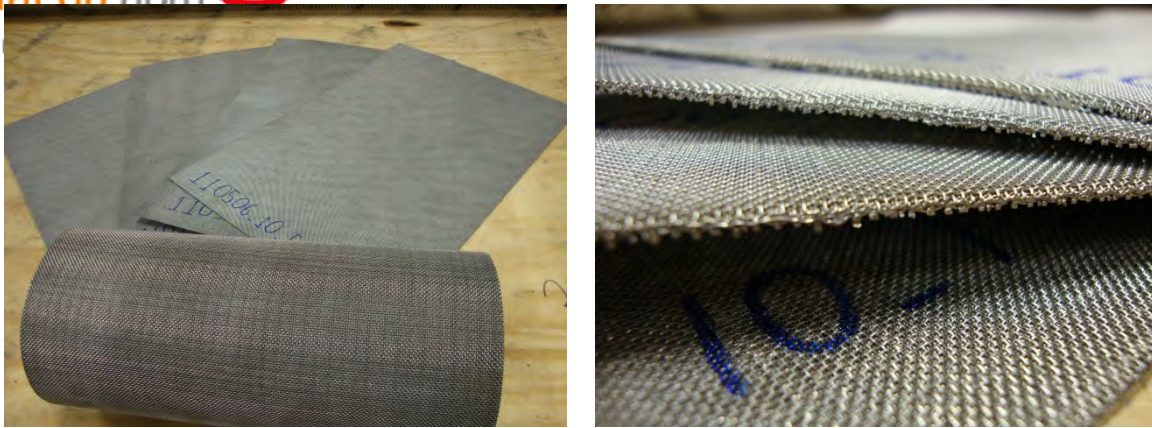
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram construídos 20 amostras de Tela Premium com dimensões representativas. A Tela consiste de um tubo base perfurado de aço 13%-Cr, norma API 5CT, cujo padrão de furação varia em função do limite de resistência do material, geralmente de classe L80 (80 kpsi). O elemento filtrante fabricado a partir de tecido metálico de aço inoxidável AISI 316L, obtido pelo processo de soldagem por difusão, é concêntrico ao tubo base e forma uma camada tubular. O espaço entre o tubo base e o elemento filtrante é estabilizado com a inclusão da camada de drenagem. A carcaça protetora é soldada na parte mais exterior da Tela, garantindo proteção mecânica ao elemento filtrante. A Tela fabricada no Brasil (Figura 1) é muito semelhante ao que é atualmente importada.



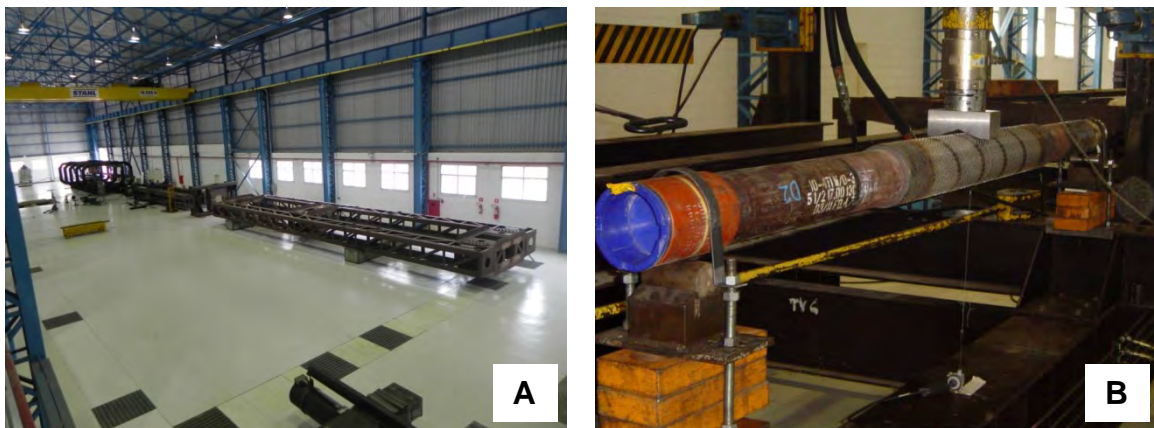
**Figura 1.** Ilustração indicando os componentes da Tela Premium.

A produção do elemento filtrante com abertura poral de 250  $\mu\text{m}$ , principal componente da Tela, foi realizada nas instalações do Grupo de Materiais do LNLS, utilizando o processo de soldagem por difusão (Figura 2). A escolha da malha foi determinada pelos padrões da Statoil e por ser o mais utilizado nos campos de produção no Brasil. As superfícies dos tecidos metálicos a serem soldados foram preparadas por limpeza sem o uso de reagentes químicos controlados. A atmosfera do forno foi controlada para atingir ambiente de vácuo, a fim de garantir a ausência de oxigênio, o que poderia criar uma barreira para formação da interface de difusão. A caracterização microestrutural do elemento soldado por difusão foi realizada por análise metalográfica da secção transversal do componente. As imagens foram geradas a partir de microscópio óptico metalográfico. Os corpos de prova para ensaio de tração foram preparados seguindo a norma ASTM E8M. O ensaio de tração foi conduzido em temperatura ambiente utilizando máquina universal de ensaios. Estes ensaios também foram conduzidos no Grupo de Materiais do LNLS.<sup>(7-9)</sup>



**Figura 2.** Elemento filtrante após processo de soldagem por difusão.

Para qualificação das Telas Premium foram realizados diversos ensaios mecânicos e de comportamento em condições que simulam operações dentro de um poço de petróleo. Além de esforços mecânicos de tração, torção, arrancamento da carcaça protetora, dobramento e esmagamento, também foram conduzidos ensaios de erosão, com o objetivo de determinar a vida útil do componente em operação. Os testes em grande escala (ensaios mecânicos) foram conduzidos em parceria com o Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas (LEME) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo, conforme evidencia a Figura 3.



**Figura 3.** Instalações físicas do LEME, onde foram realizados os ensaios em grande escala, mostrando o equipamento para A) ensaio de tração e B) ensaio de dobramento.

A operação para instalação da Tela no poço exige esforços mecânicos que podem danificar o equipamento. Nesse sentido, os ensaios em grande escala têm como objetivo definir os limites de resistência dos componentes da Tela Premium em condições de tensões que simulam aqueles durante esta operação. Além de ser o principal componente da Tela, o elemento filtrante também possui menor resistência mecânica do conjunto. Assim, este componente pode ser exposto a danos permanentes, prejudicando a sua funcionalidade.

A avaliação dos componentes após os ensaios mecânicos foi realizada com o objetivo de determinar a integridade física e visual do elemento filtrante. Para controle da abertura poral, foram realizados ensaios de *filter cut point*, na White House Scientific, UK, em amostras de elemento filtrante soldado por difusão antes (controle) e depois dos ensaios mecânicos.<sup>(10)</sup>

Por fim, para qualificar o produto em termos erosão, foram realizados ensaios em parceria com o Laboratório de Ensaios Dinâmicos (LABEDIN) da Unicamp. A Figura 4 mostra o equipamento construído, incluindo o tanque de aquecimento e a bomba.

As amostras foram posicionadas em um *loop* construído especificamente para fixar o elemento filtrante sob um fluxo contínuo de água desoxigenada e de formação sintética, similar a do campo de Roncador,<sup>(11)</sup> contendo partículas abrasivas de carbeto de silício, selecionadas para não causar entupimento da tela. O ensaio foi conduzido em temperatura de 90°C a uma velocidade de aproximação controlada por uma bomba de deslocamento positivo que trabalhou com vazão máxima na ordem de 10 m<sup>3</sup>/h, variando a velocidade de aproximação das partículas (colisão com o elemento filtrante) entre 0,6 m/s, 0,9 m/s e 1,2 m/s.

Para os ensaios de erosão foram realizadas análises de perda de massa e visual do elemento filtrante com o objetivo de determinar sua integridade estrutural. Neste caso específico, foi estimada a vida útil do componente em operação.



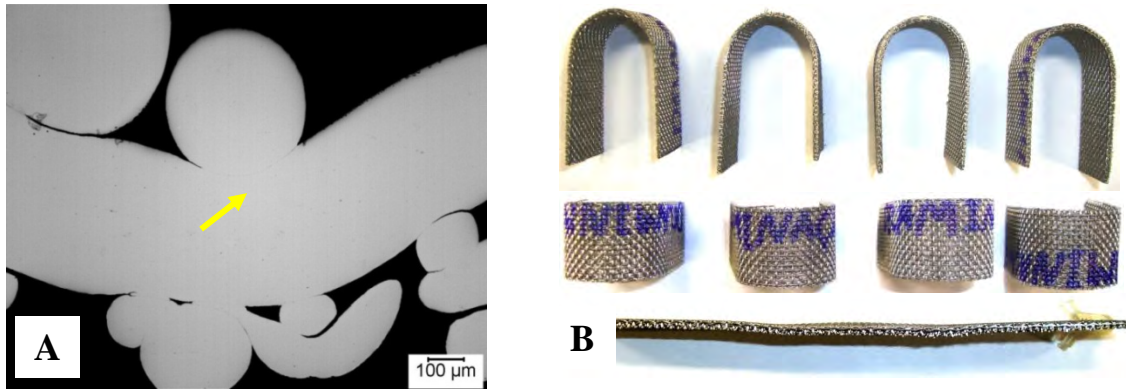
Figura 4. Esquema de montagem do equipamento para ensaio de erosão/corrosão.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análises Metalográficas

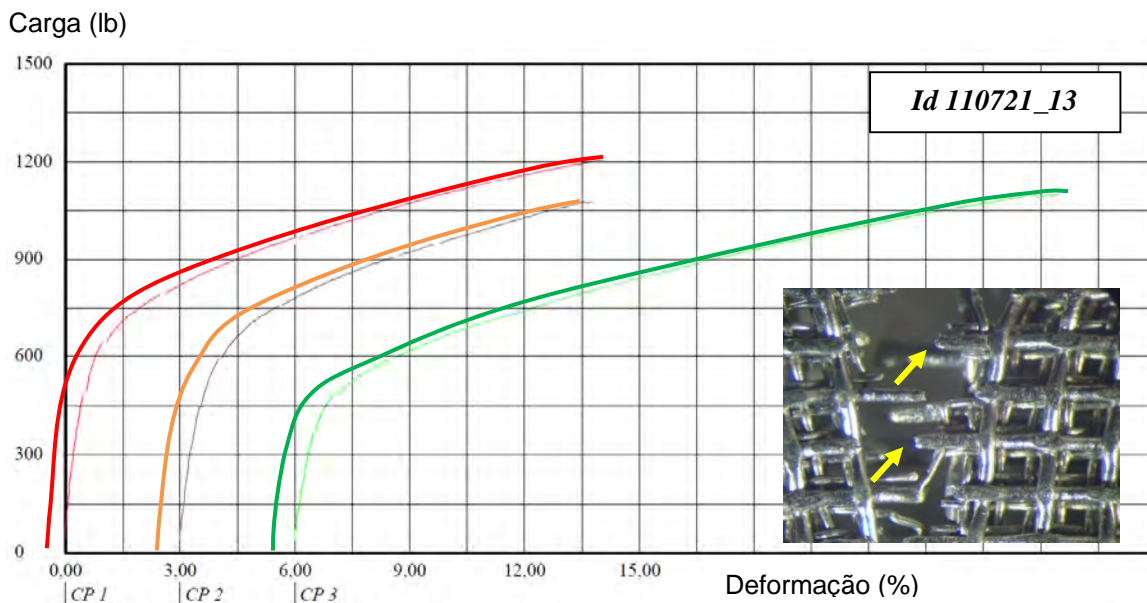
A análise microestrutural do elemento filtrante após processo de soldagem por difusão evidencia a formação de uma interface uniforme e que garante a união entre os grãos do tecido metálico (Figura 5a). O elemento filtrante é composto de três a quatro camadas de tecido metálico trefilado em aço inoxidável AISI 316L. Cada camada possui uma malha (abertura poral) definida. A soldagem por difusão promove a união tanto dos grãos dentro da própria malha quanto entre camadas de tecido, favorecendo a formação de um material com elevada resistência mecânica, como pode ser observado na Figura 5b, que mostra o elemento filtrante após ensaio

de dobramento (ensaio de delaminação). Foi observado que não houve ruptura e/ou quebra dos fios dos tecidos metálicos.



**Figura 5.** Caracterização microestrutural da interface de difusão do aço AISI 316L e ensaio de delaminação após o processo de soldagem do elemento filtrante.

A Figura 6 mostra os resultados típicos de ensaio de tração para elemento filtrante após soldagem por difusão (abertura de 250 µm). Como o material é poroso, a área da seção transversal não é contínua, por isso usa-se força (lb). Observa-se no detalhe da Figura 6, a região de falha onde ocorreu o rompimento dos fios do tecido metálico.



**Figura 6.** Ensaio de tração em elemento filtrante soldado por difusão e região da fratura.

### 3.2 Ensaios em Grande Escala

A Figura 7 mostra os protótipos após os ensaios em grande escala, a partir de esforços mecânicos que simulam as condições de tração, torção, arrancamento da carcaça protetora, dobramento e esmagamento da Tela Premium. As amostras foram cortadas para análise visual do elemento filtrante, a fim de avaliar a integridade estrutural do componente.



**Figura 7.** Visão dos elementos filtrantes após testes em grande escala.

Os resultados obtidos são apresentados de forma resumida na Tabela 1. É possível observar que quase todos os valores estão de acordo com a proposta de projeto inicial (resultados esperados), definido pelos padrões de boas práticas de fabricação da indústria petroleira, exceto o ensaio de arrancamento, uma vez que não existem normas que definem estes ensaios.

**Tabela 1.** Resumo dos resultados dos ensaios em grande escala (testes de integridade mecânica)

Ensaio	Unidade	Resultados Esperados	Resultados Obtidos	
			Protótipo 1	Protótipo 2
Tração	Deformação (mm)	N/A	10,8	10,7
	Carga, kN (lbf)	889,6 (200.000)	889,6 (200.000)*	
Dobramento	Deformação (°/ft), deflexão (mm)	30°/100 ft	30°/100 ft, correspondente a deflexão de (40 ± 1) mm	
	Carga, kN (lbf)	N/A	100 ± 1 (2248)*	
Esmagamento	Deformação (%)	40% de deformação ou 65,5 mm	40% deformação do diâmetro externo original	
	Carga, kN (lbf)	N/A	950 ± 5 (2136)	1015 ± 5 (2282)
Torção	Ângulo (°)	N/A	1,38 ± 0,01	
	Torque, kgf.m (lb.ft)	822 (5,112)	822 ± 4 (5,945)*	
Arrancamento	Carga, kN (lbf)	441,5 (99.250)	367,9 (82.700)	425,4 (95.600)

\* Valores correspondentes à carga mínima aplicada sem ocorrer ruptura da amostra.

O ensaio de arrancamento foi determinado a partir de uma carcaça protetora com área aberta menor do que o protótipo construído. Assim, os resultados são mais conservadores, uma vez que quanto maior a área aberta, menor a resistência mecânica do componente. De fato, os valores registrados estão muito próximos daqueles inicialmente propostos. Assim, reduzindo a área aberta de 40% a 20% é possível aumentar a resistência do material para níveis acima dos valores esperados. Na Figura 8, observa-se que a fratura ocorreu na ZTA (zona

termicamente afetada) do cordão de solda que une a carcaça protetora ao anel de montagem da Tela Premium,<sup>(12)</sup> mas não no cordão de solda propriamente dito.

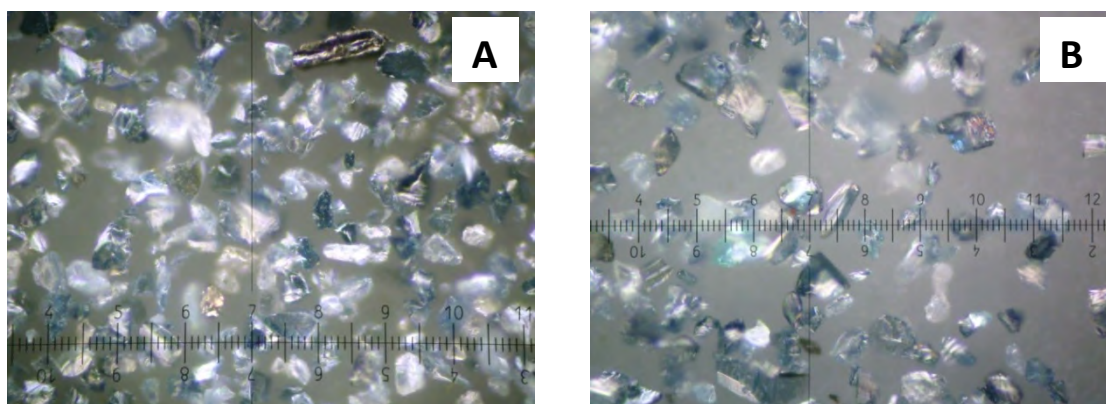


**Figura 8.** Tela Premium após ensaio de arrancamento, evidenciando ruptura na ZTA.

### 3.3 Ensaios de Erosão

Os ensaios de erosão foram realizados com o objetivo de determinar a vida útil do elemento filtrante quando submetido simultaneamente a condições diversas que são características dentro de um poço de petróleo. Os resultados mostram que os efeitos da erosão são claramente mais significativos sobre a degradação do elemento filtrante (em especial no que se refere à perda de massa) quando comparado com os fenômenos de corrosão.

A Figura 9 mostra a morfologia e geometria das partículas de carboneto de silício antes e após os ensaios após um período de 48 horas na condição mais agressiva de velocidade de aproximação de partícula (equivalente à vazão de 10 m<sup>3</sup>/h). É possível notar que não há mudança na forma e tamanho das partículas, o que garante abrasão constante no elemento filtrante durante o período.



**Figura 9.** Partículas abrasivas de SiC antes e após o ensaios (período de 48 h).

A Figura 10 mostra o elemento filtrante (abertura poral de 250  $\mu$ m) para uma mesma condição de ensaio. Observa-se que não há danos superficiais após a exposição em ambiente agressivo de erosão associado à corrosão. O elemento filtrante sofreu um processo de polimento por conta do fluxo contínuo de partículas abrasivas, sem que danos estruturais fossem observados. É possível notar discreto produto de corrosão sobre a superfície do elemento filtrante (seta vermelha). Tanto a morfologia quanto a abertura poral do componente não sofreram alterações visuais que pudessem comprometer a integridade física do componente após os ensaios. A perda de



massa máxima registrada após 48 h de ensaio foi de 2,7%, valor muito baixo quando analisada a agressividade do meio.

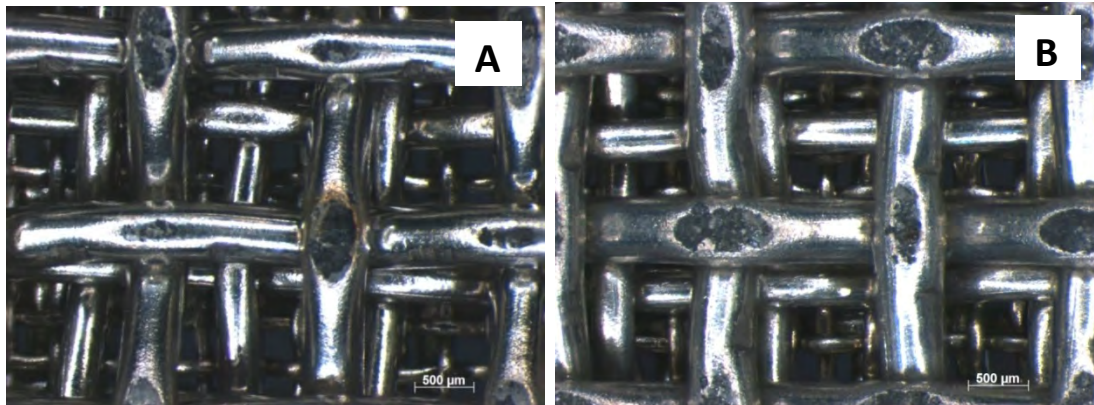


Figura 10. Superfície do elemento filtrante A) antes e B) após ensaio de erosão/corrosão.

O tempo de vida útil do elemento filtrante submetido à ação de erosão foi estimado utilizando modelos matemáticos disponíveis na literatura. A Figura 11 representa a indicação de vida útil estimada em serviço<sup>(13)</sup>. Os dados adquiridos foram suficientes para prever a vida em serviço como função da produção líquida de barris diária (BLPD). É importante salientar que o modelo de Cameron é muito conservador, assumindo uma relação linear entre a velocidade de escoamento e erosão. Isso não é verdade para o fluxo lento, com partículas de baixa energia que não causam qualquer dano ao elemento filtrante. Além disso, o modelo foi desenvolvido para telas expansíveis tocando as paredes do poço e submetidos ao fluxo direto das perfurações. Quanto maior o valor de BLPD, menor será o tempo de vida útil do elemento. Embora os valores não representem condições reais de operação, o modelo é validado como indicação do comportamento do elemento para prever seu tempo em serviço.

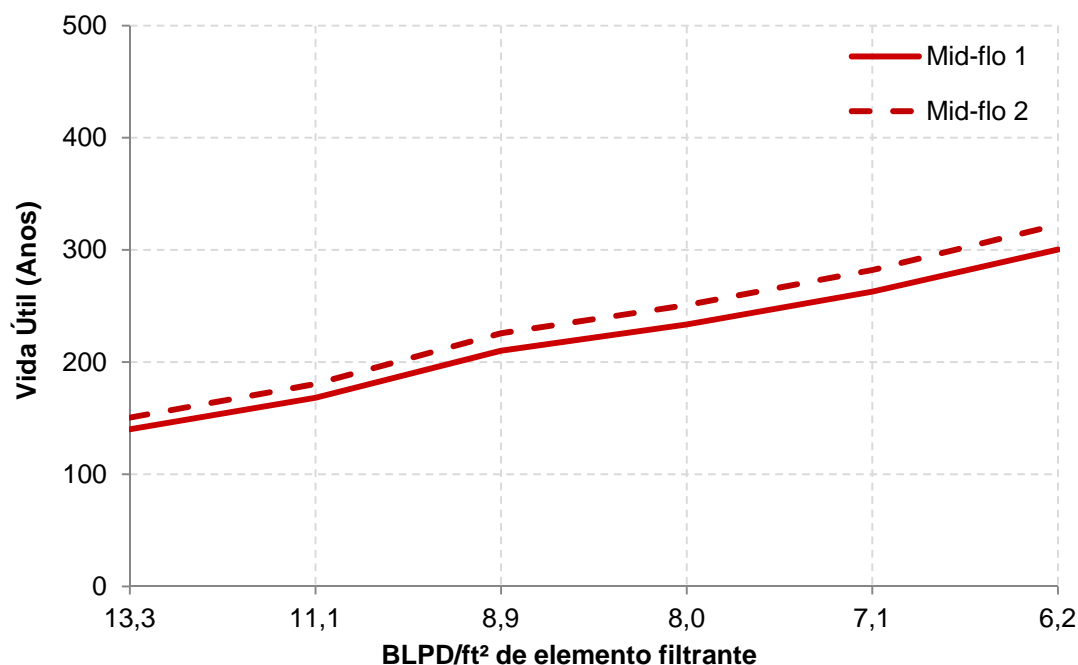


Figura 11. Vida útil em serviço do elemento filtrante (115 µm) em ambiente de erosão/corrosão.

O elemento filtrante foi fabricado com a tecnologia de soldagem por difusão desenvolvida pelo Grupo de Materiais do LNLS. A caracterização microestrutural e das propriedades mecânicas da interface evidenciaram comportamento típico do aço inoxidável AISI 316L. Os protótipos de Tela Premium foram construídos e testados de acordo com os procedimentos originalmente propostos, em concordância com a Adest e a Statoil, para ensaios mecânicos em grande escala e ambiente de erosão.

A partir dos ensaios mecânicos em grande escala concluiu-se que, apesar das condições distintas de carregamento, não houve danos permanentes que pudessem comprometer a capacidade de filtração do elemento soldado por difusão. As tensões mecânicas produzidas pelos ensaios de tração, torção, esmagamento, dobramento e arrancamento da carcaça protetora não produziram defeitos na tela. De fato, a análise visual mostrou a integridade do elemento filtrante após os ensaios, mesmo em áreas mais suscetíveis, como a zona termicamente afetada (ZAT) do processo de soldagem TIG (solda de costura).

Os ensaios de erosão/corrosão produziram resultados para diferentes condições que simulam as de operação dentro de um poço de petróleo. Os elementos filtrantes testados mostraram que não foi observado dano superficial devido à ação combinada de erosão associada à salinidade. A relação da perda de massa em função da velocidade de aproximação (vazão contínua) foi conclusiva para determinar baixa degradação deste componente. Os modelos matemáticos foram utilizados para estimar o tempo de vida útil do componente usando os dados coletados durante os ensaios. Pode-se concluir que muito embora o modelo seja conservador, a estimativa de vida mínima do elemento filtrante atende as necessidades operacionais tradicionalmente demandadas nos campos produtivos do litoral brasileiro.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem primeiramente ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, a Statoil Brasil e a ANP (Agência Nacional do Petróleo) pelo apoio financeiro do projeto e à Petrobrás, em especial ao Cenpes, pelo suporte técnico durante o desenvolvimento do trabalho. E também a Adest, que contribui continuamente para a execução deste projeto.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 Kazakov, N. F. *Diffusion Bonding of Materials*. Pergamon Press, 1985.
- 2 Salehi, M. T. *Isostatic diffusion of some super plastic alloys*, Ph.D. Thesis, UMIST, Manchester, 1990.
- 3 Bagnato, O. R. et al. *Condicionamento de Forno de Alto Vácuo para Processo de Soldagem por Difusão*, Congresso Brasileiro de Aplicação de Vácuo na Indústria e na Ciência, Itajubá, Brasil, 2011.
- 4 Bagnato, O. R. et al. *Development and Interfacial Analysis of Diffusion Bonding Between Copper and Stainless Steel for Application in Ultra-High Vacuum*, International Congress of Mechanical Engineering, Natal, Brasil, 2011.
- 5 Schwartz, M. M. *Metals Joining Manual*, McGraw-Hill, NY, USA 1979.
- 6 Underdown, D.R. and Hopkins, S. *Design and Implementation of Retention/Filtration Media for Sand Control*. *SPE Drill & Compl* 23 (3): 235-241. SPE-103782-PA, 2008;

- 7 Gardner, L. et al. Elevated temperature material properties of stainless steel alloys. Journal of Constructional Steel Research 66, p. 634-647, 2010.
- 8 Bagnato, O. R. et al. Development and Interfacial Analysis of Diffusion Bonding Between Copper and Stainless Steel for Application in Ultra-High Vacuum, International Congress of Mechanical Engineering, Natal, Brasil, 2011.
- 9 Rosales, M. J., et al. Corrosion Evaluation of Austenitic Stainless Steel 316L Microstructures due to Different Heat Treatment Conditions, Encontro da Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais, Gramado, Brasil, 2011.
- 10 Rideal, G. R. Storey, J. Morris, T. R. Aperture Testing of Sand Screens Using Calibration Microspheres. White House Scientific, UK, Report Testing Procedure.
- 11 Souza, A.L.S. et al. Petrobras S.A. Water Management In Petrobras: Developments And Challenges; OTC 17258, Offshore Technology Conference, 2 May-5 May 2005, Houston, Texas
- 12 Rosales, M. J. et al. Mechanical Properties and Characterization of TIG-Welded Filter Elements Used in Oilfield Sand Control Screens, Encontro da Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais, Florianopolis, Brasil, 2012.
- 13 Cameron, J., Jones, C. Development Verification and Application of a Screen Erosion Model, SPE 107437, 2007.