



**CONVERSÃO QUÍMICA COM NANOCERÂMICO À BASE DE ZIRCÔNIO
APLICADA COM PRÉ-TRATAMENTO EM AÇO SAE 1015**

Henrique Cechinel Casagrande¹

João Batista Rodrigues Neto²

Anderson Daleffe³

Thiago Ramos Stellin Malagrino⁴

Guilherme Dias Zarur⁵

Célia de Fraga Malfatti⁶

Jovani Castelan⁷

Resumo: Este estudo avaliou o efeito de um recobrimento nanocerâmico à base de Zr aplicado como pré-tratamento em um aço baixo carbono SAE 1015. Observou-se redução significativa do ângulo de contato de 61° (amostra sem tratamento) para 31°, (amostra tratada), indicando maior afinidade da água destilada pela superfície. A diferença média de 30° e os desvios padrões de 3° e 2°, respectivamente, apontam para aumento da molhabilidade e maior uniformidade após o recobrimento, sugerindo elevação da energia superficial e potencial melhoria na adesão de revestimentos. A análise de rugosidade mostrou acréscimo nos parâmetros Ra e Rz após aplicação do nanocerâmico (Ra de 2,6 µm para 2,8 µm; Rz de 18,8 µm para 21,5 µm), indicando o aumento da rugosidade superficial e por consequência o aumento da área superficial de contato. Essa condição é favorável à ancoragem de revestimentos como pintura, por exemplo. A caracterização morfológica por MEV evidenciou superfície mais porosa, com fissuras. A análise por EDS confirmou a presença de zircônio (Zr) e de oxigênio (O), sugerindo a formação de óxidos/hidróxidos, os quais podem contribuir para maior adesão de revestimentos e resistência à corrosão.

Palavras-chave: Pré-tratamento de superfície por conversão química. Nanocerâmico à base de zircônio. Nanotecnologia aplicado em materiais metálicos.

¹ Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais. UFSC. E-mail: henrique_cechinel@hotmail.com

² Prof. Dr. UFSC. E-mail: joao.neto@ufsc.edu.br

³ Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁴ Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais. UFSC. E-mail: thiago.malagrino@nione.tec.br

⁵ Doutorando em Ciência e Engenharia de Materiais. UFSC. E-mail: Guilherme.zarur@nione.tec.br

⁶ Prof. Dra. UFRGS. E-mail: materiaisxenergia@gmail.com

⁷ Prof. do Centro Universitário UniSATC. E-mail: jovani.castelan@satc.edu.br



1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem crescido o interesse por revestimentos de conversão à base de titânio e/ou zircônio [1], impulsionado pelas preocupações ambientais e de saúde [2] associadas aos tradicionais revestimentos de conversão com cromatos e fosfatos [3-4].

Tradicionalmente, têm sido empregados revestimentos à base de cromo hexavalente ($\text{Cr } 6^+$), fosfato de zinco ($\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$) e cromo trivalente ($\text{Cr } 3^+$). Entretanto, os revestimentos cromatizados apresentam elevada toxicidade e caráter carcinogênico, levantando sérias questões ambientais e de saúde pública. De forma semelhante, os revestimentos fosfatizados (PO_4^{3-}) estão associados ao fenômeno de eutrofização em ambientes de água doce [5]. Diante disso, a pesquisa recente tem se concentrado no desenvolvimento de revestimentos de conversão ambientalmente amigáveis, capazes de serem aplicados à temperatura ambiente, mantendo níveis adequados de proteção contra a corrosão e viabilidade econômica.

As tecnologias alternativas devem ser ambientalmente seguras, economicamente viáveis e capazes de oferecer resistência à corrosão e aderência de pintura equivalentes às obtidas nos substratos ferrosos e não ferrosos tratados pelos processos convencionais [6]. Os revestimentos de conversão à base de titânio [7] ou zircônio [8] têm demonstrado atender a grande parte desses requisitos, apresentando, assim, elevado potencial para aplicações industriais avançadas.

Esses revestimentos são classificados como de conversão, uma vez que interagem quimicamente com o substrato: os átomos superficiais sofrem ataque pela solução de conversão e, nas regiões onde se estabelecem reações catódicas, ocorre um aumento localizado do pH, promovendo a precipitação dos íons presentes na solução na forma de óxidos e hidróxidos [9].

Devido às suas excelentes capacidades de processamento, propriedades mecânicas destacadas e elevada produtividade, os aços são amplamente empregados em setores do cotidiano, como na indústria automotiva, em eletrodomésticos e em diversos equipamentos [10]. Contudo, os aços integram a classe de metais ativos que podem sofrer corrosão quando expostos a agentes presentes no ambiente, o que pode comprometer seu desempenho [11-12].

Descrever as ações técnicas necessárias para aprimorar a resistência à corrosão dos aços em diferentes ambientes é essencial para ampliar a vida útil dos



componentes metálicos. Entre as diversas tecnologias disponíveis para elevar a resistência à corrosão de aços, os revestimentos destacam-se como uma estratégia amplamente adotada e eficaz [13-14].

A fim de melhorar a adesão entre o substrato metálico e o revestimento, além de aumentar a durabilidade do sistema, é prática usual realizar um pré-tratamento da superfície do aço antes da aplicação de revestimentos orgânicos [15].

O pré-tratamento desempenha dupla função: além de proteger o substrato metálico contra a corrosão durante o processo de revestimento, também favorece a adesão do revestimento orgânico à superfície metálica e contribui para a melhoria da resistência global à corrosão [16-22].

Tais revestimentos são formados pela imersão do substrato em uma solução química, onde ocorre a reação direta com o metal, resultando na formação de uma camada protetora sobre a superfície [23].

O ácido hexafluorozircônico (H_2ZrF_6) tem sido empregado com êxito em diferentes substratos, incluindo ligas de alumínio, ligas de magnésio, bem como aços galvanizados a zinco (Zn) e aços ao carbono [24-33].

A formação de uma camada de conversão requer a remoção da camada inicial de óxido nativo [34]. Em tratamentos baseados em zircônio e titânio, esse processo é promovido por íons fluoreto [35]. Durante a dissolução anódica dos (hidr)óxidos metálicos nativos, as reações catódicas associadas provocam um aumento local do pH na superfície, favorecendo a precipitação de óxidos de zircônio e titânio [36-40].

O objetivo deste trabalho é investigar a influência do pré-tratamento de superfície na deposição de nanozircônio e na molhabilidade do aço baixo carbono SAE 1015, laminado a frio. Para isso, serão comparadas amostras com e sem a aplicação do pré-tratamento. A caracterização será realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-FEG), visando validar a formação da camada depositada, além de ensaios de molhabilidade para determinar o ângulo de contato entre o líquido e o sólido, e ensaio de perfil de rugosidade para avaliar possíveis alterações topográficas.



2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 AMOSTRAS DE AÇO BAIXO CARBONO SAE 1015.

As amostras utilizadas nessa pesquisa possuem teor de carbono leve, sendo considerado um aço de baixo carbono SAE 1015 (conforme comprovado no ensaio de espectrometria). As amostras foram preparadas por uma máquina de corte a LASER da fabricante AMADA modelo FLC 3015 AJ, com as seguintes dimensões: 30 x 20 x 2 mm (milímetros). As amostras passaram pelo processo de jateamento abrasivo a fim de eliminar resíduos superficiais e, carepa remanescente do processo de laminação. O equipamento para este processo, fica no laboratório de aspersão térmica da UNISATC. O jateamento é uma técnica amplamente aplicada no setor industrial, uma vez que promove a remoção de contaminantes superficiais e altera a morfologia da superfície metálica, favorecendo a adesão da tinta, por exemplo [41-42]. Para a execução do jateamento, foi empregada uma pressão de 1 bar, com granulhas metálicas de cerca de 0,7 mm de ângulo de abertura.

2.2 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA PARA CARACTERIZAÇÃO DA CHAPA DE AÇO SAE 1015.

A amostra utilizada para este ensaio foi inicialmente cortada via processo LASER (conforme citado no item 2.1), e na sequência, foi retificada com uma retífica da fabricante Mello modelo P36 do laboratório de usinagem da UNISATC, com o objetivo de eliminar quaisquer rugosidades grosseiras na superfície que possam dificultar o ensaio em questão.

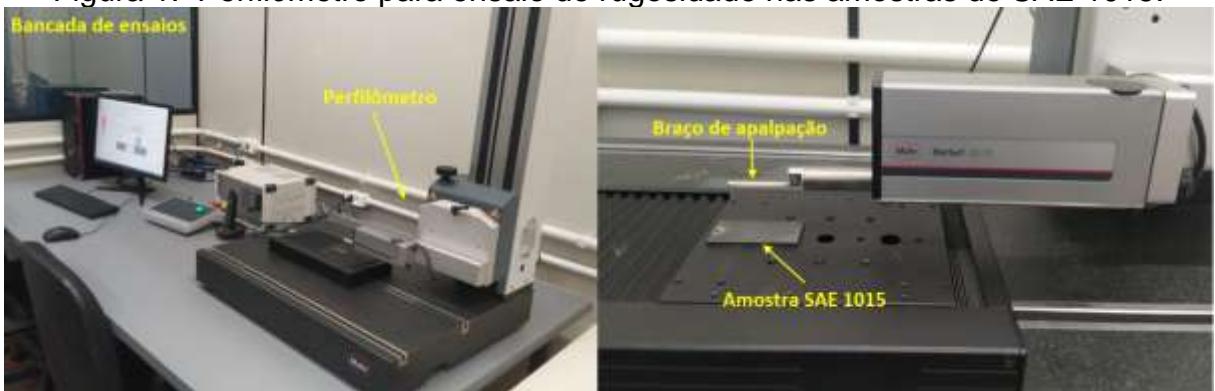
Para caracterização química das amostras utilizou-se o espectrômetro da fabricante BRUKER modelo Q2 ION. Para o ensaio em questão, foi utilizado potência de 400 Watts por um período de 30 segundos. Salienta-se o ensaio em triplicata para validação do método.

2.3 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DA CHAPA DE AÇO SAE 1015.

Para realizar o teste de perfil de rugosidade, utilizou-se um perfilômetro da marca Mahr, modelo MarSurf GD 25. Foram realizadas três medições ao longo

da chapa em avaliação. O equipamento, apresentado na Figura 1, pertence ao laboratório de engenharia de superfície e tribologia do centro universitário UNISATC.

Figura 1: Perfilômetro para ensaio de rugosidade nas amostras de SAE 1015.



Fonte: Do autor (2025)

2.4 MEV-FEG - MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA COM EMISSÃO DE CAMPO.

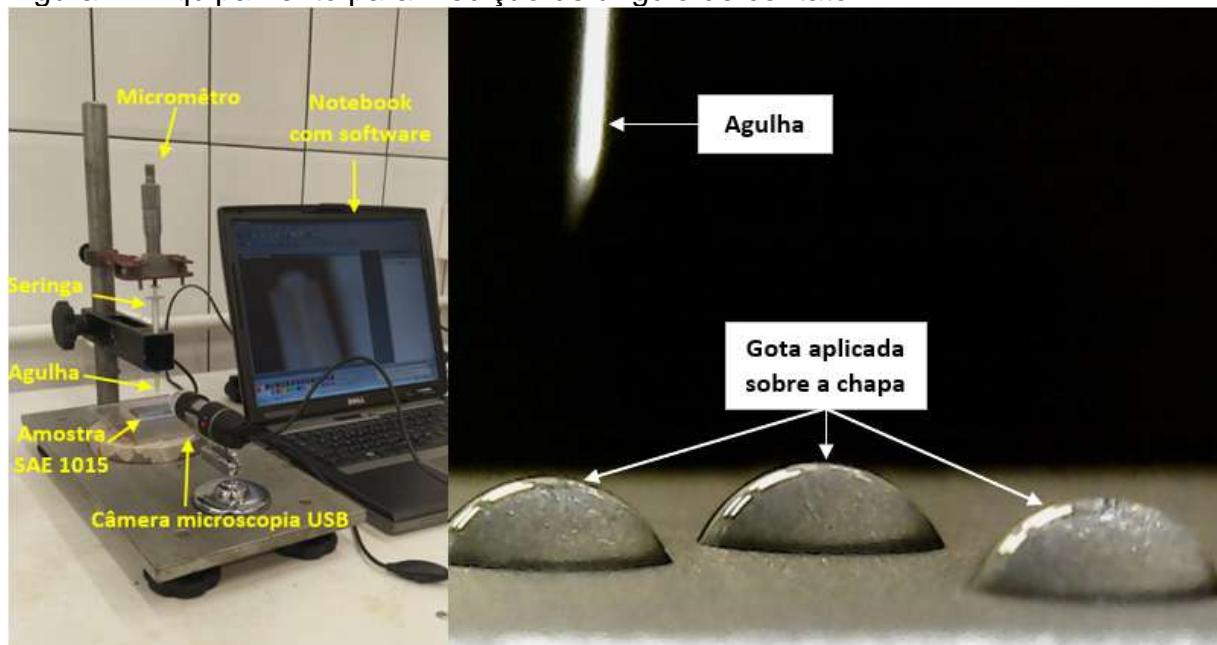
Após o tratamento de superfície, algumas amostras foram destinadas à análise em MEV-FEG, com o propósito de verificar a presença de óxido de zircônio depositado na superfície. As análises foram realizadas em um microscópio eletrônico de varredura Neo Scope – modelo JCM-7000, disponibilizado pelo Laboratório de Tecnologia e Caracterização Mecânica (LATECME) do SENAI Joinville. As imagens foram obtidas utilizando detecção por elétrons secundários (SE2) e elétrons retroespalhados (BSD), sob tensão de aceleração de 15 kV.

2.5 ÂNGULO DE CONTATO (MOLHABILIDADE)

O ensaio foi conduzido em duas condições experimentais: amostra de referência (sem tratamento de superfície), e amostra submetida a tratamento nanocerâmico (processo utilizado comercialmente). O dispositivo para este ensaio foi desenvolvido no Laboratório Pronto 3D da UNISATC e consiste em uma seringa de 1 mL acoplada a uma agulha (0,45 × 13 mm) e a um micrômetro Mitutoyo com resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 0 a 75 mm. Para a determinação do ângulo de contato, utilizou-se um microscópio digital USB com software específico de análise. Os testes foram realizados em triplicata nas chapas com e sem pré-

tratamento de superfície, de acordo com a norma ASTM D7334. A Figura 2 detalha o equipamento para medição do ângulo de contado. O método utilizado para o ensaio foi por gota séssil, sendo o líquido utilizado água destilada.

Figura 2: Equipamento para medição de ângulo de contado.



Fonte: Do autor (2025)

2.6 PRÉ-TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE

Para a realização do pré-tratamento de superfície, foi montada uma bancada experimental no Laboratório de Química da UNISATC, conforme ilustrado na Figura 3. O método empregado foi o de imersão, conhecido como *dip-coating*. Na etapa inicial, utilizaram-se desengraxante e decapante comerciais, seguidos por lavagem com água deionizada. O desengraxante foi aplicado com o objetivo de remover óleos, graxas e contaminantes orgânicos provenientes do processo de laminação e manuseio das amostras, enquanto o decapante teve a função de eliminar a camada de óxidos nativos presentes na superfície do aço, favorecendo a reatividade e posterior adesão do revestimento. Em seguida, as amostras foram submetidas ao banho nanocerâmico, sendo posteriormente novamente lavadas com água deionizada para remoção de resíduos e, por fim, submetidas ao processo de

secagem. A Tabela 1 detalha as etapas do pré-tratamento e seus valores de tempo, temperatura e concentração.

Tabela 1: Parâmetros de tempo, temperatura e concentração para cada produto adicionado nas etapas do processo de pré-tratamento de superfície.

Etapa	Tempo (s)	Temperatura (°C)	Concentração
Desengraxante	180	55-70	7 %
Decapante	300	25 - 70	10 %
Água DI	60	25	100 %
Nanocerâmico	180	20 - 30	4%
Água DI	60	25	100 %
Secagem	120	90 - 130	-

Fonte: Do autor (2025)

Figura 3: Bancada de ensaio para aplicação do tratamento de superfície com nanocerâmico.



Fonte: Do autor (2025)

De acordo com as especificações do fabricante, o pH da solução foi ajustado para a faixa de 4,0 a 5,5, sendo monitorado por meio de papel indicador. Para a etapa de imersão das amostras, utilizou-se um equipamento de *dip-coating* desenvolvido no Laboratório Pronto 3D da UNISATC. O sistema é composto por um motor de passo NEMA 17, com resolução de 200 passos por rotação, assegurando elevada precisão no deslocamento vertical durante o processo. O controle é realizado eletronicamente por meio de uma plataforma Arduino Uno, permitindo a



programação tanto da velocidade de movimentação vertical quanto do tempo de imersão. Conforme reportado por Saldanha et al. [43], a velocidade ideal de imersão é de 7 mm/s, visto que o movimento de retorno pode comprometer a qualidade da camada de conversão. Dessa forma, o método de *dip-coating* apresenta vantagens por garantir maior precisão no tempo de imersão e evitar tremores ou oscilações das amostras durante o ensaio.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓPTICA – OES

A Tabela 2 apresenta a composição química das amostras de aço ao carbono analisadas neste estudo. Conforme os critérios estabelecidos pela norma ASTM A29/A29M, o material corresponde a um aço baixo carbono, classificado como SAE 1015.

Tabela 2: Comparaçao de composição química aço SAE 1015.

Elementos	% em massa	ASTM A29/A29M
Carbono (C)	0,146	0,13 – 0,18
Silício (Si)	0,017	-
Manganês (Mn)	0,454	0,3 – 0,6
Fósforo (P)	0,0098	0,04 máx.
Enxofre (S)	0,0096	0,05 máx.
Ferro (Fe)	Bal.	Bal.

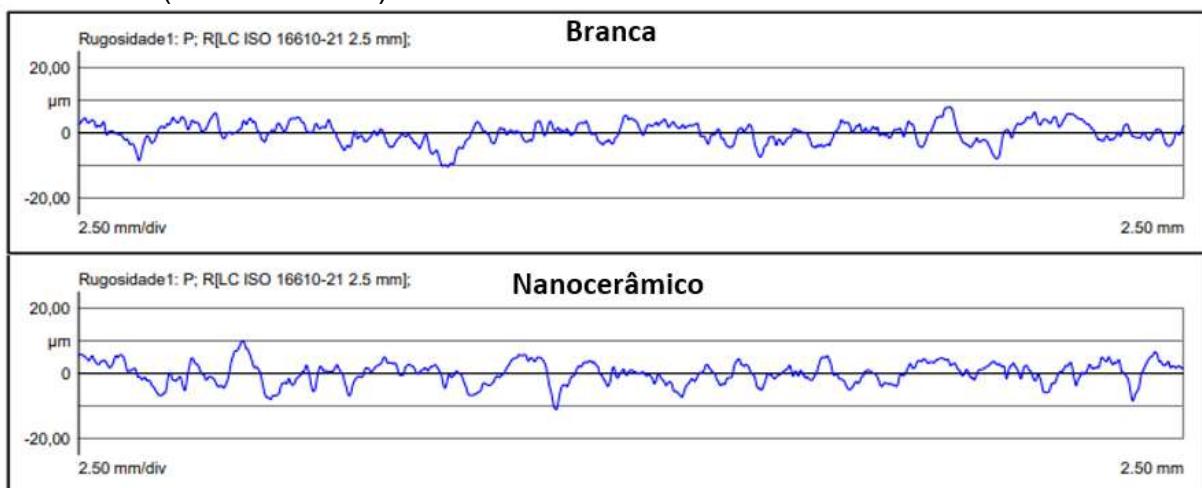
Fonte: Do autor (2025)

3.2 RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DA CHAPA DE AÇO SAE 1015

A Figura 4 apresenta os perfis de rugosidade obtidos nas superfícies das amostras de aço SAE 1015, comparando-se a condição sem pré-tratamento (Branca) e após a aplicação do pré-tratamento nanocerâmico. Observa-se que, em ambos os casos, a superfície apresenta flutuações características do processo de jateamento, porém a amostra com revestimento nanocerâmico apresenta maior

variação na topografia, evidenciada pela maior amplitude entre os picos e vales. Esse comportamento indica que o tratamento promoveu uma alteração sutil, mas perceptível, na morfologia da superfície, o que pode favorecer a ancoragem de filmes ou revestimentos subsequentes.

Figura 4: Perfil de rugosidade nas amostras sem pré-tratamento (Branca) e com pré-tratamento (Nanocerâmico).



Fonte: Do autor (2025)

Os resultados quantitativos, apresentados na Tabela 3, corroboram com essa observação. O parâmetro médio de rugosidade (R_a) aumentou de $2,6 \pm 0,2 \mu\text{m}$ para $2,8 \pm 0,4 \mu\text{m}$ após o pré-tratamento, indicando um acréscimo na irregularidade superficial. Da mesma forma, o parâmetro R_z , que expressa a diferença média entre os picos mais altos e os vales mais profundos, aumentou de $18,8 \pm 2,5 \mu\text{m}$ para $21,5 \pm 5,3 \mu\text{m}$, sugerindo que a superfície se tornou mais acidentada. Além disso, tanto os valores de R_p (altura máxima dos picos) quanto de R_v (profundidade máxima dos vales) apresentaram acréscimos após o tratamento, reforçando a maior heterogeneidade topografia.

Tabela 3: Perfil de rugosidade na amostra de aço SAE 1015.

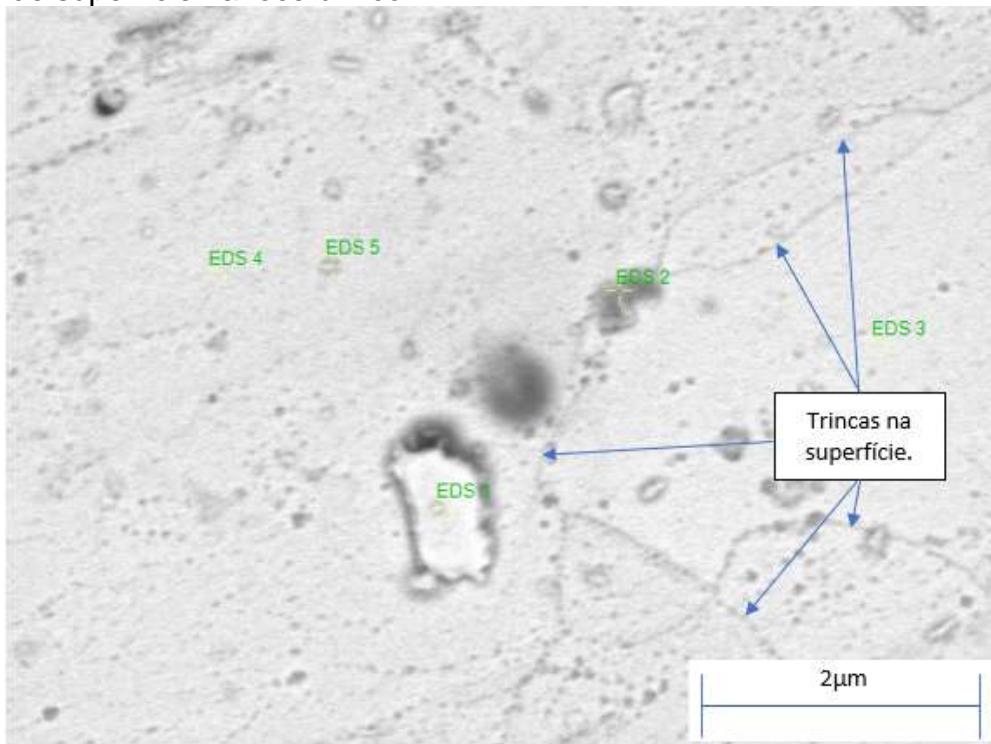
Parâmetro	Sem pré-tratamento	Com pré-tratamento
R_a (μm)	$2,6 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,4$
R_z (μm)	$18,8 \pm 2,5$	$21,5 \pm 5,3$
R_p (μm)	$8,1 \pm 1,4$	$10,2 \pm 3,8$
R_v (μm)	$10,8 \pm 1,8$	$11,3 \pm 1,5$

Fonte: Do autor (2025)

3.3 MEV-FEG - MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA COM EMISSÃO DE CAMPO

A caracterização morfológica das amostras foi realizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada à espectroscopia de energia dispersiva (EDS). A Figura 5 ilustra a superfície analisada, na qual é possível observar a presença de fendas no substrato metálico. Após o tratamento com revestimento nanocerâmico, a superfície apresentou uma morfologia porosa, acompanhada por algumas fissuras. Essa porosidade favorece a penetração do eletrólito até o substrato [44-45], permitindo reações de dissolução e a formação de produtos de corrosão no interior das fendas [46-47].

Figura 5: Morfologia superficial da amostra de SAE 1015 com pré-tratamento de superfície nanocerâmico.

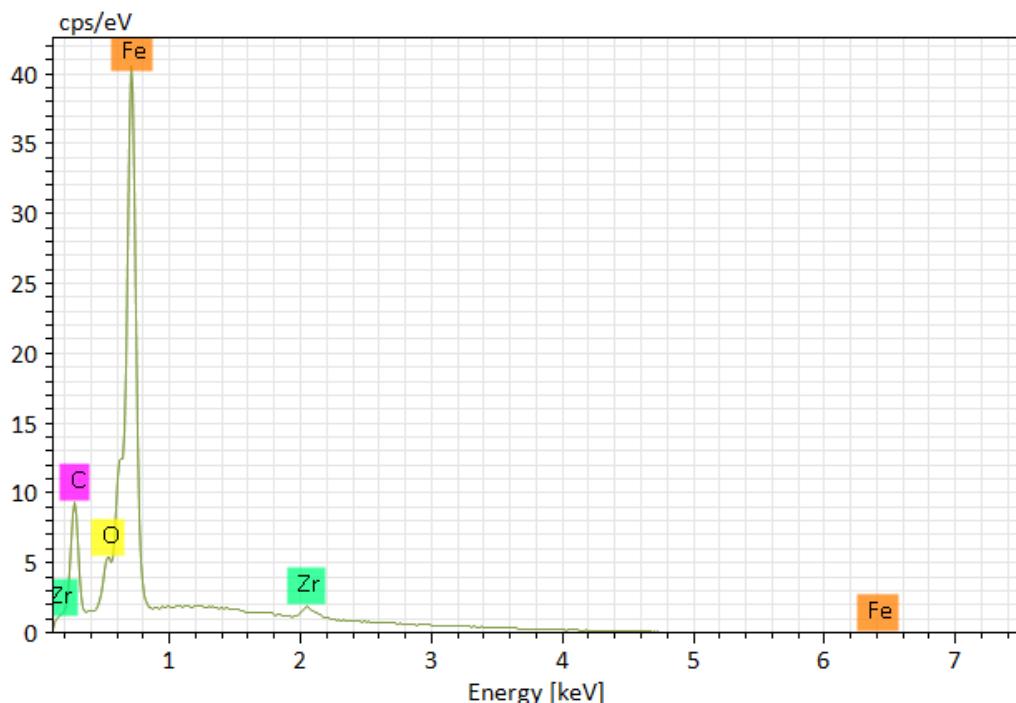


Fonte: Do autor (2025)

O EDS 1 apresentado na Figura 6 confirma que o tratamento com H_2ZrF_6 promoveu a incorporação de Zr sobre a superfície do aço SAE 1015. A detecção simultânea de O (oxigênio) sugere a formação de compostos de zircônio, como

óxidos/hidróxidos de Zr, que são responsáveis por aumentar a adesão de revestimentos subsequentes e melhorar a resistência à corrosão.

Figura 6: Picos da análise de EDS 1, elementos C, Fe, Zr, e O na amostra de SAE 1015 com tratamento de superfície nanocerâmico.

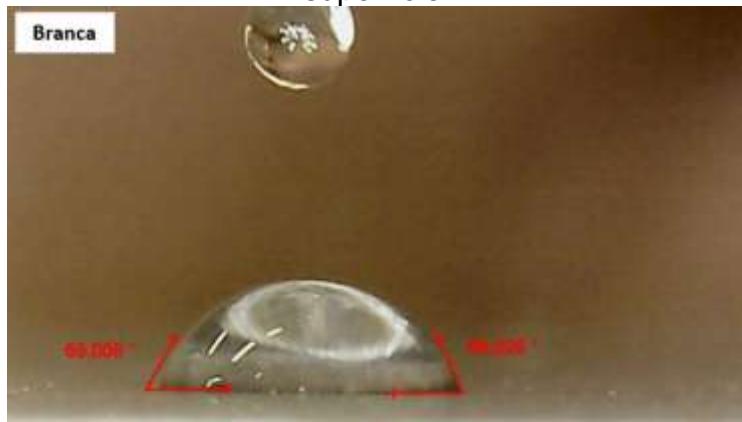


Fonte: Do autor (2025)

3.4 ÂNGULO DE CONTATO (MOLHABILIDADE)

As Figuras 7 e 8 trazem os resultados para as amostras sem pré-tratamento (Branca) e com pré-tratamento (Nanocerâmico), respectivamente.

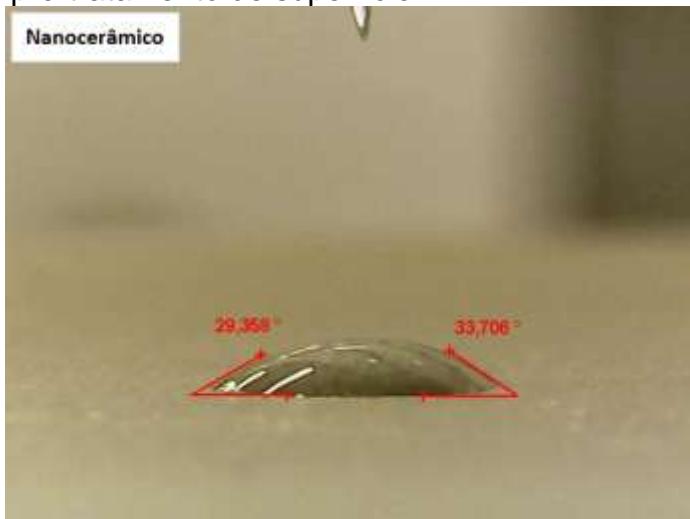
Figura 7: Molhabilidade na amostra branca de SAE 1015, sem pré-tratamento de superfície.



Fonte: Do autor (2025)

A Figura 7 apresenta as imagens obtidas pelo método da gota séssil para as amostras sem tratamento (Branca) e com revestimento nanocerâmico. Nota-se que a amostra Branca apresentou maior ângulo de contato, com valores médios próximos a 61° , evidenciando menor afinidade da superfície com a água. Em contrapartida, a amostra com recobrimento nanocerâmico exibiu ângulos significativamente menores, em torno de 31° , indicando aumento expressivo da molhabilidade. Essa redução no ângulo de contato demonstra que o pré-tratamento promoveu alterações físico-químicas na superfície do aço, tornando-a mais hidrofílica, o que pode favorecer a adesão de revestimentos orgânicos e inorgânicos subsequentes.

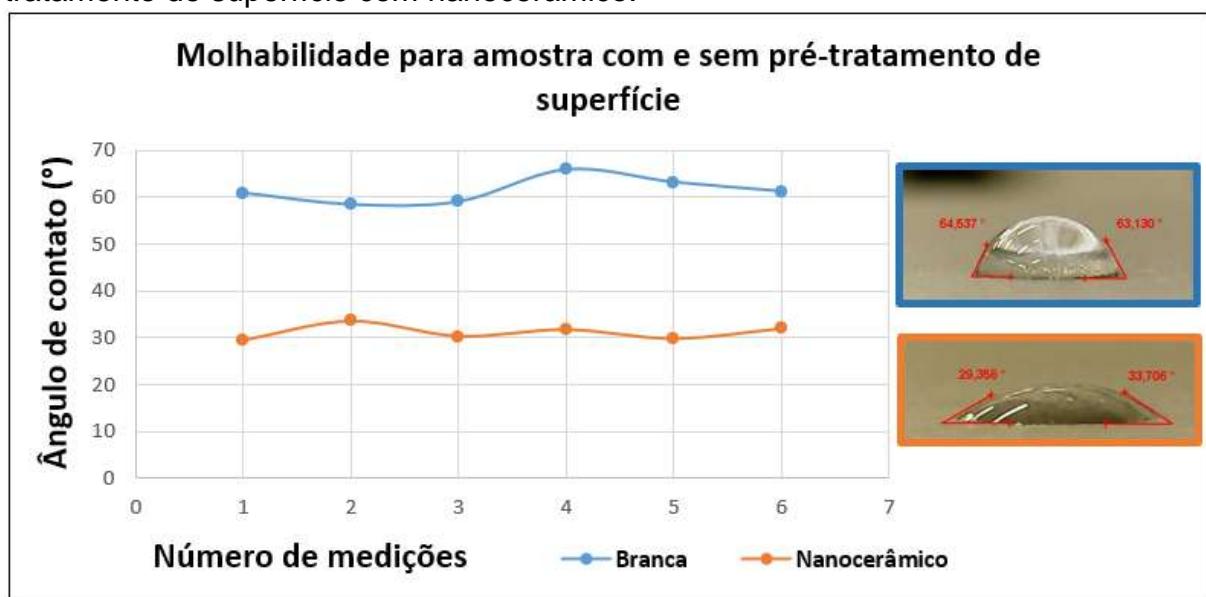
Figura 8: Molhabilidade na amostra branca de SAE 1015, com pré-tratamento de superfície.



Fonte: Do autor (2025)

A Figura 9 detalha os resultados para amostra com e sem o pré-tratamento de superfície com nanocerâmico. A amostra com o pré-tratamento de superfície apresentou molhabilidade maior comparado com a amostra sem pré-tratamento, ou seja, a amostra tratada com nanocerâmico deixa a superfície com maior hidrofilicidade, o que possui maior adesão da tinta sobre a superfície metálica.

Figura 9: Gráfico de ensaio de molhabilidade para amostra com e sem pré-tratamento de superfície com nanocerâmico.



A Tabela 4 detalha a média e o desvio padrão para as duas situações estudadas.

Tabela 4: Resultados para molhabilidade com e sem pré-tratamento de superfície com nanocerâmico.

Amostras:	Ângulo de contato (°)		Desvio padrão
	média		
Amostra Branca	61		3
Amostra com nanocerâmico.	31		2

Fonte: Do autor (2025)



O tratamento de superfície com nanocerâmico evidenciou uma melhoria significativa na molhabilidade, conforme mostrado pela redução do ângulo de contato de 61° (amostra branca) para 31° (amostra tratada), indicando maior afinidade da água pela superfície. A diferença média de aproximadamente 30° e os respectivos desvios padrões (3° sem pré-tratamento e 2° com pré-tratamento) sugerem não apenas maior molhabilidade, mas também maior uniformidade após o recobrimento. Esses resultados implicam aumento da energia de superfície e potencial melhoria em aplicações que dependem de boa adesão de líquidos, como processos de limpeza, lubrificação ou deposição de filmes.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos demonstram que o pré-tratamento nanocerâmico à base de zircônio, aplicado ao aço baixo carbono SAE 1015, promoveu alterações significativas em suas propriedades superficiais. O ensaio de molhabilidade evidenciou redução expressiva do ângulo de contato, de 61° para 31°, indicando maior afinidade da água pela superfície e diminuição da energia superficial, o que tende a favorecer a adesão de revestimentos, como por exemplo a pintura. A análise de rugosidade mostrou incremento nos parâmetros Ra, Rz, Rp e Rv, revelando maior heterogeneidade topográfica e consequente ampliação da área de contato, o que contribui para a ancoragem mecânica de camadas subsequentes. A caracterização morfológica por MEV revelou uma superfície mais porosa, com presença de fissuras, enquanto a análise por EDS confirmou a presença de zircônio (Zr) e oxigênio (O), sugerindo a formação de óxidos/hidróxidos associados ao pré-tratamento com H₂ZrF₆. Em conjunto, esses resultados confirmam que o recobrimento nanocerâmico não apenas modifica a composição química da superfície, mas também melhora suas características físico-químicas e morfológicas da superfície, potencializando, como pré-tratamento, aplicações que demandam maior adesão e resistência à corrosão, como de revestimentos orgânicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC e a empresa NIONE pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios, e a



Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] MILOSEV, I., FRANKEL, G.S. Review—Conversion Coatings Based on Zirconium and/or Titanium. *Journal of The Electrochemical Society*, Volume 165 (3) Pag. 127-144 (2018).
- [2] POSSANI, G.K., SCHNEIDER, E.L., CIÉNCIA, L.C. Revestimentos nanocerâmicos à base de óxido de zircônio e ácido tânico para proteção contra corrosão de aço laminado a frio. *REVISTAMATÉRIA*. Volume 29. (2024).
- [3] FEDRIZZI L., DEFLORIAN F., BONORA PL., PASINI E. EIS study of environmentally friendly coil coating performances. *Progress in Organic Coatings*. Volume 29. (1996).
- [4] MILOSEC, I., FRANKEL, G.S. Review—Conversion Coatings Based on Zirconium and/or Titanium. *Journal of The Electrochemical Society*. Volume 165. (2018).
- [5] ADHIKARI, S., UNOCIC, K.A., ZHAI, Y., FRANKEL, G.S., ZIMMERMAN, J., FRISTAD, W. Hexafluorozirconic acid based surface pretreatments: Characterization and performance assessment. *Electrochimica Acta*. Volume 56. (2011).
- [6] ASEMANI, H.R., AHMADI, P., SARABI, A.A., MOHAMMADLOO, H.E. Effect of zirconium conversion coating: Adhesion and anti-corrosion properties of epoxy organic coating containing zinc aluminum polyphosphate (ZAPP) pigment on carbon mild steel. *Progress in Organic Coatings*. (2016).
- [7] LUCENA, M.P.P., FERREIRA, J.Z. Estudo de parâmetros do processo de obtenção de revestimentos de conversão nanocerâmicos à base de titânio e zircônio. *69º Congresso Anual da ABM*. (2014).
- [8] LIU, X.Y et al. Environmentally Friendly Zr-Based Conversion Nanocoatings for Corrosion Inhibition of Metal Surfaces Evaluated by Multimodal X-ray Analysis. *ACS Applied Nano Materials*. Volume 2. (2019).
- [9] MOHAMMADLOO HE, SARABI AA, ALVANI AAS, SAMEIE H, SALIMI R. Nano-ceramic hexafluorozirconic acid based conversion thin film: Surface characterization and electrochemical study. *Surface and Coatings Technology*. Volume 206. (2012).
- [10] FENG, G., JIN, Z., JIANG, Y., WANG, X., ZHU, D. Localized corrosion propagation of steel in cracked mortar and long-term corrosion of steel reinforcement in cracked concrete in seawater environment. *Corrosion Science*. Volume 228. (2024).

- [11] HE, W., GAO, X., YAN, R., WANG, Y., MA, H. Zr-based conversion film fabricated on cold rolled steel by separately providing zirconium and fluorine ions: Performance and mechanism study. *Electrochimica Acta*. Volume 506. (2024).
- [12] YAN, R., GAO, X., HE, W., CHEN, T., MA, H. 1-Hydroxyethylidene-1,1-diphosphonic acid (HEDP)-Zn complex thin films for the corrosion protection of cold-rolled steel (CRS). *Corrosion Science*. Volume 157. (2019).
- [13] VATANI, R., ZAMANI-MEYMIAN, M., GHAFFARINEJAD, A., KHALILZADEH, S. Corrosion protection of Cr–Cu alloy coating on stainless steel. *Surface & Coatings Technology*. Volume 474. (2023).
- [14] GUO, Q., WANG, S.Y., LIU, Z., GAO, X. Influence of phytic acid on the microstructure, composition, and corrosion resistance performance of Zr-based painting pretreatment film. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. Volume 132. (2024).
- [15] SAID, V. H., HAAKAMANN, F., BRINKBAUMER, J., ULBRICHT, M. Comparison of the nucleation and growth of a phosphate conversion coating on Zn–Al and Zn–Al–Mg coatings under the influence of a corrosion inhibitor film. *Surface & Coatings Technology*. Volume 451. (2022).
- [16] GAO, X., LI, W., MA, H. Effect of anti-corrosive performance, roughness and chemical composition of pre-treatment layer on the overall performance of the paint system on cold-rolled steel. *Surface & Coatings Technology*. Volume 329. (2017).
- [17] JAYARAJ, J., KUMAR, S.A., SRINIVASAN, A., RAGHU, K.G., ARUNCHANDRAN, C. Corrosion and in vitro characteristics of cerium phosphate based chemical conversion coating on AZ31 magnesium alloy. *Applied Surface Science*. Volume 644. (2024).
- [18] WANG, Y., XIAO, W., MA, K., DAI, C., WANG, D., WANG, J. Enhancing corrosion resistance of the CaCO₃/MgO coating via ultrasound-assisted chemical conversion with addition of ethylenediamine tetra-acetic acid (EDTA) on AZ41 Mg alloy. *Surface & Coatings Technology*. Volume 467. (2023).
- [19] GAO, X., LI, W., MA, H. Polyacrylic acid/Ca nanoparticles hybrid hydrogel: Synthesis, characterization and application in pretreatment layer. *Journal of Alloys and Compounds*. Volume 805. (2029).
- [20] LOPERENA, A.P., LEHR, I.L., SAIDMAN, S.B. Enhancement of the adhesion and anticorrosive properties of an epoxy coating by the application of a cerium based film. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. Volume 118. (2022).
- [21] ZHU, W., LI, W., UM, S., YANG, Y., ZUO, X. The adhesion performance of epoxy coating on AA6063 treated in Ti/Zr/V based solution. *Applied Surface Science*. Volume 384. (2016).

- [22] LOSTAK, T., et al. Formation and characterization of Fe³⁺/Cu²⁺-modified zirconium oxide conversion layers on zinc alloy coated steel sheets. *Electrochimica Acta*. Volume 112. (2013).
- [23] WANG, S.H., LIU, C.S., WANG, L. A Comparative Study of Zirconium-Based Coating on Cold Rolled Steel. *Advanced Materials Research*. Volumes 291-294. (2011).
- [24] SABABI, M., TERRYN, H., MOL, J.M.C. The influence of a Zr-based conversion treatment on interfacial bonding strength and stability of epoxy coated carbon steel. *Progress in Organic Coatings*. Volume 105. (2017).
- [25] ANDREATTA, F., LANZUTTI, A., PAUSSA, L., FEDRIZZI, L. Addition of phosphates or copper nitrate in a fluotitanate conversion coating containing a silane coupling agent for aluminium alloy AA6014. *Progress in Organic Coatings*. Volume 77. (2014).
- [26] RAMEZANZADEH, B., ATTAR, M.M. Effects of Co(II) and Ni(II) on the Surface Morphology and Anticorrosion Performance of the Steel Samples Pretreated by Cr(III) Conversion Coating . *CORROSION*. Volume 68. (2012).
- [27] VELASQUEZ, C.S., PIMENTA, E.P.S., LINS, V.F.C. Anticorrosive Behavior and Porosity of Tricationic Phosphate and Zirconium Conversion Coating on Galvanized Steel. *JMEPEG*. Volume 27. (2018).
- [28] LUCENA, M.P.P. Estudo e otimização dos parâmetros do processo de conversão de revestimentos à base de Zr e Ti sobre aço galvanizado. LUME. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais – PPGE3M. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/114983/000954760.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acessado em: 18 de agosto de 2025.
- [29] PINHEIRO, J.S., CARDOSO, H.R.P., FERREIRA, J.Z. Proteção de ligas de alumínio por anodização sulfúrica e selagem com revestimento de conversão de Zr. *INTERCORR*. (2018).
- [30] YOGANANDAN, G., PREMKUMAR, K.P., BALARAJU, J.N. Evaluation of corrosion resistance and self-healing behavior of zirconium–cerium conversion coating developed on AA2024 alloy. *Surface and Coatings Technology*. Volume 270. (2015).
- [31] KHUN, N.W., FRANKEL, G.S. Composition and corrosion protection of hexafluorozirconic acid treatment on steel. *Materials and Corrosion*. (2015).
- [32] ARDELEAN, H., FRATEUR, I., MARCUS, P. Corrosion protection of magnesium alloys by cerium, zirconium and niobium-based conversion coatings. *Corrosion Science*. Volume 50. (2008).



- [33] PAREJA, R.R., IBANEZ, R.L., MARTÍN, F., BARRADO-RAMOS, J.R., LEINEN, D. Corrosion behaviour of zirconia barrier coatings on galvanized steel. *Surface & Coatings Technology*. Volume 200. (2006).
- [34] FEDRIZZI, L., DEFLORIAN, F., BONORA, P.L. Corrosion behaviour of fluotitanate pretreated and painted aluminium sheets. *Electrochimica Acta*. Volume 42. (1997).
- [35] VERDIER, S., LAAK, N.V., DALARD, F., METSON, J., DELALANDE, S. An electrochemical and SEM study of the mechanism of formation, morphology, and composition of titanium or zirconium fluoride-based coatings. *Surface & Coatings Technology*. Volume 200. (2006).
- [36] NOEDLIEN, J.H., WALMSLEY, J.C., OSTERBERG, H., NISANCIOGLU, K. Formation of a zirconium-titanium based conversion layer on AA 6060 aluminium. *Surface and Coatings Technology*. Volume 153. (2002).
- [37] ANDREATTA, F., TURCO, A., GRAEVE, I., TERRYN, H., WIT, J.H.W., FEDRIZZI, L. SKPFM and SEM study of the deposition mechanism of Zr/Ti based pre-treatment on AA6016 aluminum alloy. *Surface & Coatings Technology*. Volume 201. (2007).
- [38] CEREZO, J., VANDENDAEL, I., POSNER, R., LILL, K., WIT, J.H.W., TERRYN, H. Initiation and growth of modified Zr-based conversion coatings on multi-metal surfaces. *Surface & Coatings Technology*. Volume 236. (2013).
- [39] LOSTAK, T., MALJUSCH, A., KLINK, B., KREBS, S., KIMPEL, M., FLOCK, J., SCHULZ, S., SCHUHMANN, W. Zr-based conversion layer on Zn-Al-Mg alloy coated steel sheets: insights into the formation mechanism. *Electrochimica Acta*. Volume 137. (2014).
- [40] LUNDER, O., SIMENSEN, C., YU, Y., NISANCIOGLU, K. Formation and characterisation of Ti–Zr based conversion layers on AA6060 aluminium. *Surface and Coatings Technology*. Volume 184. (2004).
- [41] WALCZAK, MARIUSZ., SZALA, MIROSTAW. Efect of shot peening on the surface properties, corrosion and wear performance of 17-4PH steel produced by DMLS additive manufacturing. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. (2021).
- [42] KAMEYAMA, YUTAKA., KOMOTORI, JUN. Effect of micro ploughing during fine particle peening process on the microstructure of metallic materials. *Journal of Materials Processing Technology*. Volume 19. (2009).
- [43] SALDANHA, JULIA., CARDOSO, HENRIQUE RIBEIRO PIAGGIO., FERREIRA, JANE ZOPPAS. Otimização das variáveis do processo de conversão de revestimento nanocerâmico à base de Titânio sobre aço galvanizado. *INTERCORR*. (2018).



- [44] TSAI, YU-TE., HOU, KUNG. HSU., BAI, CHING. YUAN.; LEE, JEOU. LEE., GER, MING. DER. The influence on immersion time of titanium conversion coatings on electrogalvanized steel. *Thin Solid Films*. Volume 518. (2010).
- [45] VERDIER, STÉPHANE., LAAKB, NICOLE VAN DER., DALARDA, FRANCISCO., METSONC, JAMES.; DELALANDE, STÉPHANE. An electrochemical and SEM study of the mechanism of formation,morphology and composition of titanium or zirconium fluoride-based coatings. *Surface & Coatings Technology*. Volume 200. (2006).
- [46] HAMDY, ABDUL SALAM., FARAHAT, SENHOR. Chrome-free zirconia-based protective coatings for magnesium alloys. *Surface & Coatings Technology*. Volume 204. (2010).
- [47] PAREJA, ROMERO., IBÁÑEZ, LÓPEZ.; MARTÍN, FRANCISCO DE PAULA., RAMOS-BARRADO, J.R.; LEINEN, DITMAR. Corrosion behaviour of zirconia barrier coatings on galvanized steel. *Surface and Coatings Technology*. v. 200. (2006).