

# Análise microestrutural e comportamento eletroquímico de partículas de SiC incorporadas em superfície de aço inoxidável duplex 2205 utilizando processo de soldagem por tocha de gás inerte tungstênio

**Hana H. Koga\* (G)1, Dalila C. Sicupira (PQ)1, Rodrigo R. Porcaro(PQ) 3**

¹ Universidade Federal de Ouro Preto, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Departamento de Química, Ouro Preto, MG, Brasil. [hana.koga@aluno.ufop.edu.br](mailto:hana.koga@aluno.ufop.edu.br).

3 Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Metalúrgia, Ouro Preto, MG, Brasil.

**RESUMO (Times New Roman, tam 12)**

O aço inoxidável duplex 2205 (AID 2205) constitui a classe ferrítica-austenítica, com microestrutura bifásica que proporcionam características únicas para o AID 2205 como a alta resistência ao escoamento, resistência à corrosão e à soldagem, e resistência a impactos. Sendo cada vez mais utilizado na construção naval, indústrias químicas e petroquímicas, produção de papel e celulose, e indústrias siderúrgicas.

No entanto, a exposição desses materiais a altas temperaturas, em processos de soldagem nos quais as fases intermetálicas prejudiciais, tais como sigma (δ), chi (χ) e nitretos podem ser formados, resulta em um desequilíbrio da proporção microestrutural, deteriorando sua dureza e resistência à corrosão. Para melhorar as propriedades do aço inoxidável duplex, técnicas de modificação da superfície podem ser aplicadas, como os revestimentos de carboneto de silício (SiC) devido a sua capacidade de formar uma camada protetora de óxido de silício, sendo depositado através da soldagem por tocha de gás inerte tungstênio (TIG). As análises microestruturais foram realizadas por microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). A análise eletroquímica foi conduzida através de estudos de impedância eletroquímica.

*Palavras-chave: Aço inoxidável duplex, carboneto de silício, soldagem por tocha de gás inerte tungstênio, resistência à corrosão*

# Introdução



O aço inoxidável duplex 2205 combina alta resistência mecânica e à corrosão devido à sua microestrutura bifásica (ferrita + austenita), sendo usado em diversas indústrias. No entanto, altas temperaturas, como na soldagem, podem formar fases indesejadas que prejudicam essas propriedades (1-3). O carboneto de silício (SiC) é um material resistente ao calor e à oxidação, e pode ser incorporado na superfície do aço inoxidável por revestimento TIG, melhorando suas propriedades mecânicas (4-6). Este trabalho visa estudar a microestrutura e o comportamento eletroquímico de partículas de SiC no AID 2205 utilizando o processo TIG.

# Experimental

A chapa do aço inoxidável duplex 2205 foi cedida pela empresa Aperam South America, na forma laminada a quente e recozida com dimensões 17 cm x 10,5 cm x 0,5 cm. O pó de SiC foi fornecido pela empresa Fiven com granulometrias entre 4 e 60 µm e utilizado para o preparo das amostras, que foram borrifadas com uma mistura de SiC e álcool etilíco sobre as amostras, em seguida foram secas a 80°C no forno e submetidas à soldagem TIG com eletrodo de tungstênio, gás nitrogênio (12L/min), 90A, 10V e 2,5 mm/s, para formar revestimentos compósitos com SiC.

Após a soldagem as amostras foram cortadas, no Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas, transversalmente à direção da soldagem com dimensões de 2,5 cm x 0,5 cm x 0,5 cm conforme figura 1 abaixo.

Diagrama, Desenho técnico

Descrição gerada automaticamente

**Figura 1.** Esquema para o preparo das amostras (adaptado de [7])

As amostras utlizadas para os testes foram o metal base (MB), soldada sem revestimento (SR), amostra revestida com SiC de ~4 µm (RSiC4), amostra revestida com SiC de ~60 µm (RSiC60).

As amostras foram embutidas em resina, lixadas até 1200 mesh, polidas com discos diamantados de 1 e 0,25 μm e atacadas com reagente Behara 2%. A microestrutura foi analisada por Microscopia Óptica, MEV e EDS, e a dureza foi medida na seção transversal por microdureza Vickers (500 gf, 5 s).

Os testes eletroquímicos seguiram a norma ASTM 106-89 [8], usando um potenciostato µStat-i 400s e um sistema de três eletrodos com eletrólito de NaCl 3,5%. As amostras foram preparadas, lixadas e limpas antes dos ensaios. O OCP foi registrado por 1 hora e a EIE foi realizada com amplitude de 10 mV e frequência de 100 kHz a 5 mHz.

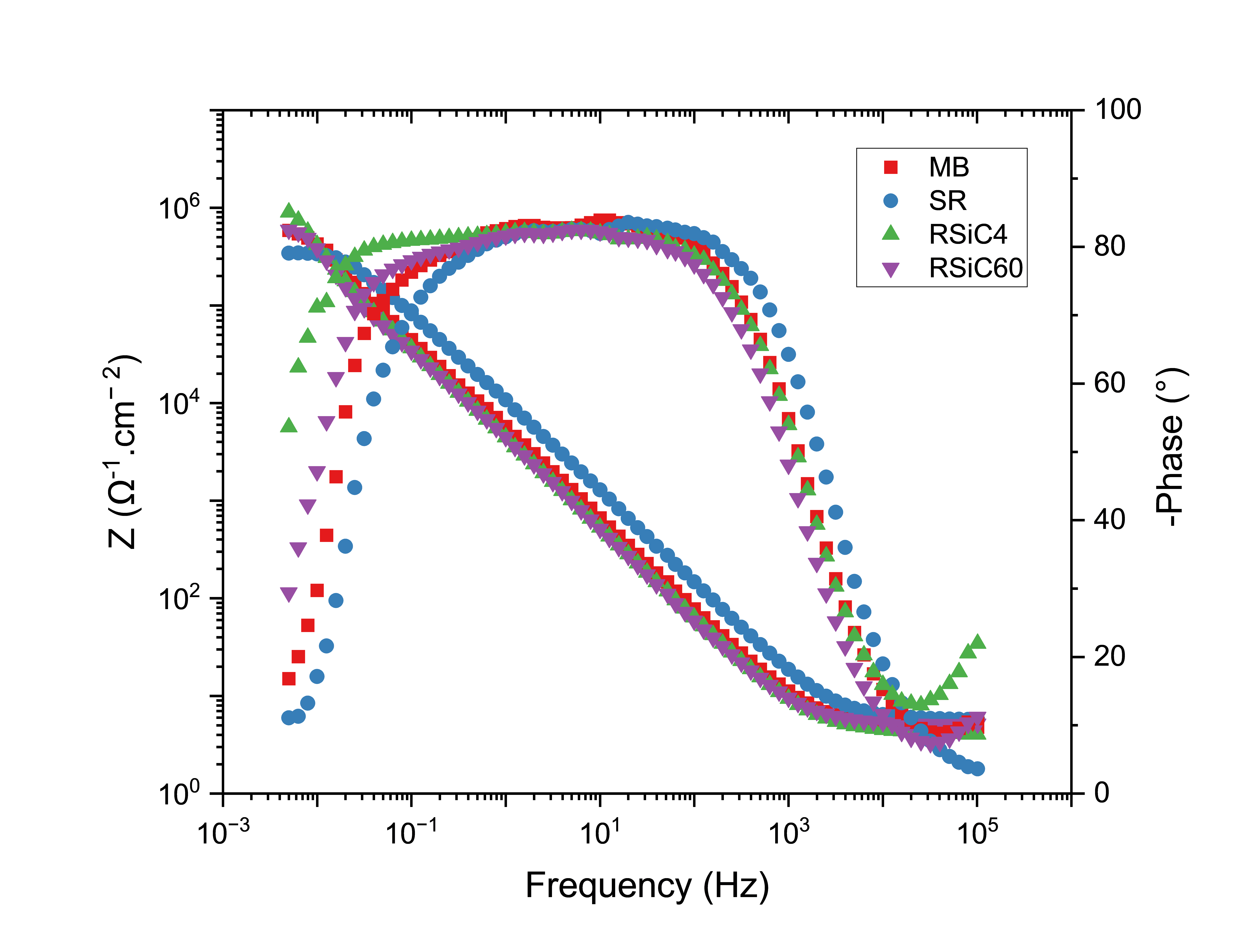
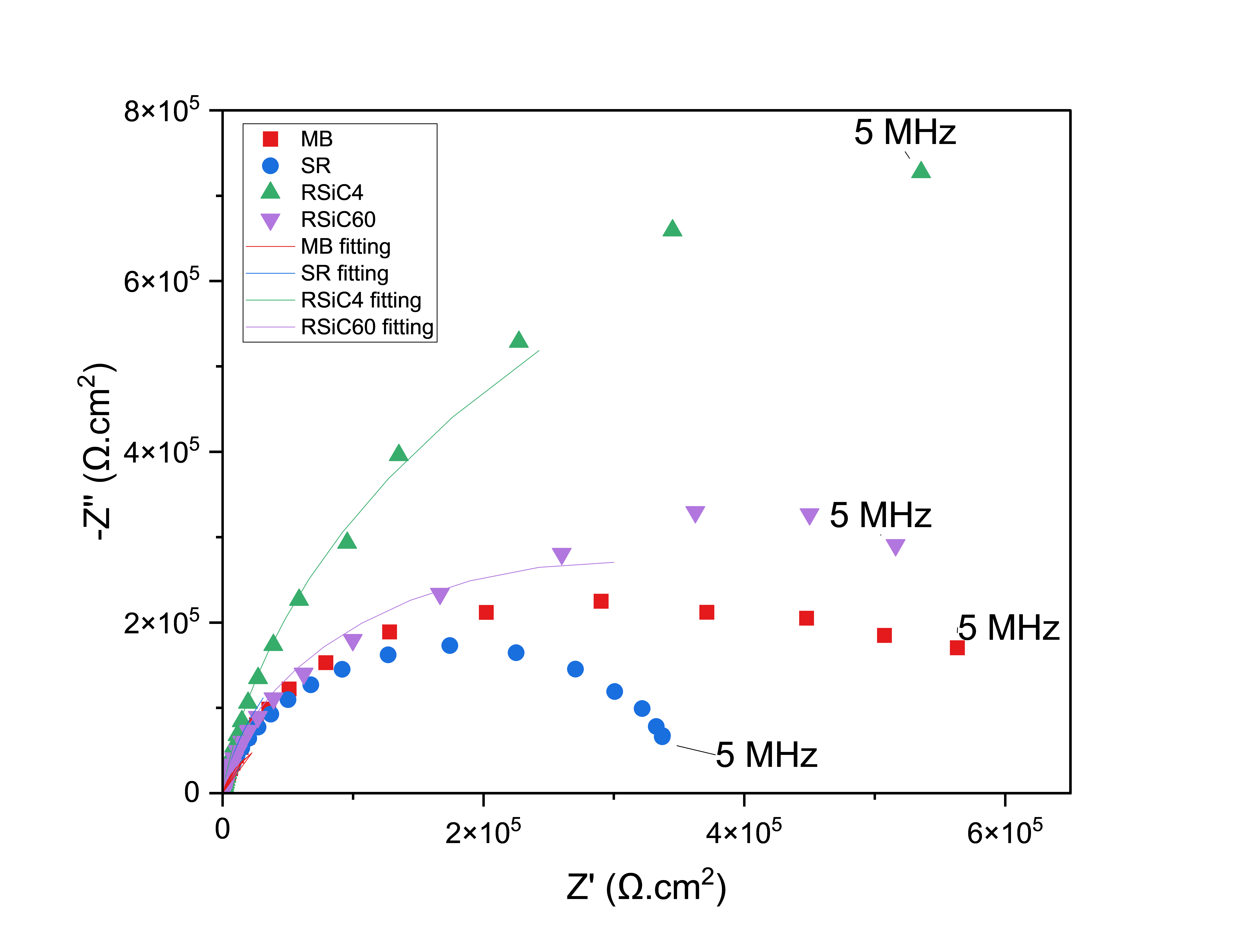
# Resultados e Discussão

# A técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) foi empregada para avaliar a resistência à corrosão de amostras de aço inoxidável duplex 2205. Os gráficos obtidos pelo software DropView 8400 e tratados no Nova 2.1 (Figura 2) evidenciaram diferenças significativas entre as amostras analisadas. A partir do diagrama de Nyquist, observou-se que a amostra RSiC4 (χ² = 1,12) apresentou o maior diâmetro do semicírculo, indicando maior resistência à corrosão, enquanto a amostra SR (χ² = 0,45) exibiu o menor diâmetro, confirmando que a ausência de revestimento compromete a resistência do aço soldado.

a)

b)

Diagrama, Esquemático

Descrição gerada automaticamente****

**Figura 2.** a) Circuito elétrico equivalente para as amostras SiC4, b) Gráfico de nyquist para as amostras e c) Gráfico de Bode para as amostras RSiC4 e RSiC60.

A análise do gráfico de Bode revelou comportamento eletroquímico semelhante entre as amostras, com ângulos de fase entre -60° e -80°, e resposta capacitiva similar. Contudo, a RSiC4 apresentou o maior módulo de impedância, corroborando sua maior resistência à corrosão. Os valores de resistência à transferência de carga obtidos foram da ordem de 10⁵ Ω·cm² para as amostras MB (6,32 × 10⁵ ± 2,52 × 10⁵), SR (2,92 × 10⁵ ± 1,05 × 10⁵) e RSiC60 (5,55 × 10⁵ ± 9,92 × 10⁴). Em contraste, a amostra RSiC4 alcançou 1,35 × 10⁶ ± 6,07 × 10⁵ Ω·cm², confirmando o melhor desempenho frente à corrosão.

Os resultados obtidos por microscopia óptica reforçam as análises eletroquímicas. A amostra RSiC4 apresentou uma distribuição mais homogênea da fase austenítica em relação à ferrítica, condição que favorece a resistência à corrosão. Na microscopia eletrônica de varredura (MEV), foi possível observar a formação de dendritos associados à fusão e incorporação das partículas de SiC na matriz metálica, o que foi confirmado pela análise de EDS. Essa morfologia contribui para a melhoria das propriedades protetivas do revestimento e explica o maior valor de resistência à transferência de carga obtido.

Em contrapartida, a amostra RSiC60 apresentou trincas associadas ao processo de soldagem e precipitação de fases intermetálicas durante a solidificação, fenômenos que comprometem a integridade microestrutural. A presença de precipitados e defeitos microestruturais identificados por MEV está diretamente relacionada à redução da resistência à corrosão, evidenciada pelos menores valores de impedância e pela maior suscetibilidade à formação de trincas.

# Conclusões

* A amostra de aço inoxidável duplex 2205 revestida com partículas SiC4 (RSiC4) apresentou uma maior resistência à corrosão, e formaram dendritos que indicam a das partículas de SiC e a sua incorporação no metal quando comparada com às demais amostras.

# Agradecimentos

Os autores agradecem à Aperam South America, Fiven, Capes, Cnpq, Fapemig e UFOP pela realização desta pesquisa e à UFOP pela concessão de bolsas de iniciação científica.

c)

# Referências

1. J. Charles in Conf. Proc. Duplex Stainless Steels ’91, Beaune, Les Éditions de Physique, 1991, Vol. 1, 3-48.
2. M. B. Mampuya; M. C. Umba; K. Mutombo et al., Mater. Today: Proc., 2020, DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.196.
3. J. R. Davis, Stainless Steel – ASM Specialty Handbook, 2nd ed., ASM International, USA, 1996, p. iii.
4. M. Rosso; I. Peter; D. Suani, J. Achiev. Mater. Manuf. Eng., 2013, 59(1), 26-36.
5. N. N. Greenwood; A. Earnshaw, Chemistry of the Elements, 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998.
6. A. N. M. Idriss; S. Mridha; M. A. Maleque, Adv. Mater. Res., 2012, 576, 467-470.
7. P. Muñoz-Escalona; et al., Mater. Sci. Technol., 2020, 36(1), 17-32.
8. ASTM G106-89, Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements, 2015.
9. A. M. B. Roldão, Tese de M.Sc., Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2010