



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS  
CURSO DE ENGENHARIA METALÚRGICA**

**YANKA MARIA ARAUJO TORRES**

**INFLUÊNCIA DA AUSTENITA REVERTIDA NA RESISTÊNCIA À  
CORROSÃO DO AÇO MARAGING 350 EM MEIO AQUOSO DE 3,5% NaCl.**

**FORTALEZA**

**2021**

YANKA MARIA ARAUJO TORRES

INFLUÊNCIA DA AUSTENITA REVERTIDA NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO  
DO AÇO MARAGING 350 EM MEIO AQUOSO DE 3,5% NaCl.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Jose Gomes da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- T649i Torres, Yanka Maria Araújo.  
Influência da austenita revestida na resistência à corrosão, do aço maraging 350 em meio aquoso de 3,5% NACL / Yanka Maria Araújo Torres. – 2021.  
45 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva.  
Coorientação: Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso.
1. Aço maraging. 2. Austenita revestida. 3. Resistência à corrosão. I. Título.

CDD 669

---

YANKA MARIA ARAUJO TORRES

INFLUÊNCIA DA AUSTENITA REVERTIDA NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO  
DO AÇO MARAGING 350 EM MEIO AQUOSO DE 3,5% NaCl.

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Metalúrgica da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial  
à obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Marcelo José Gomes da Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcelo Ferreira Motta  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus e Maria Santíssima que iluminaram meu caminho, me deram forças para persistir sempre e sempre me abençoar e mostrar o que é correto. Aos meus pais, Raylene e Esllanyo, por todas as oportunidades que me proporcionaram. Às minhas avós Ana e Norma por sempre mostrarem apoio nas minhas decisões sempre com muito amor. Ao Bernardo por estar ao meu lado nos momentos difíceis e sempre estar disponível para me ajudar. Ao Prof. Dr. Jorge Luiz, pela orientação, paciência e atenção. Aos membros da banca examinadora, Marcelo Motta e Marcelo José, pela disponibilidade. Aos meus amigos de curso, em especial Carlos Mateus, Leticia Muniz, Iuri Araújo, pelos momentos vividos durante o curso. Às minhas amigas de colégio e da vida, em especial a Karla, pelo apoio, críticas e palavras de motivação. Aos amigos do LPC, em especial Joshua e Davi por toda ajuda durante a realização do trabalho e pelos momentos de descontração.

“Pensar é o trabalho mais duro que há, o que é, provavelmente, o motivo pelo qual tão pouca gente se dedica a fazê-lo.”

Henry Ford

## RESUMO

Os aços maraging são ligas com vasta aplicação na engenharia e são aços que oferecem uma combinação única de alta resistência mecânica e tenacidade à fratura. Dessa forma, é de suma importância seu estudo, para que cada vez mais seja possível a correta aplicação destes materiais no dia a dia. O presente trabalho, buscou estudar a influência da austenita revertida na resistência à corrosão do aço maraging 350 em meio aquoso de 3,5% NaCl, nas condições para diferentes períodos de tratamento térmico de envelhecimento (1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas). Com o intuito de analisar o surgimento da austenita revertida no material, as amostras foram submetidas à difração de raio-X e detectar o surgimento desta fase no material, e para verificar a resistência do material à corrosão, foram realizados ensaios eletroquímicos de polarização, impedância eletroquímica e OCP. Os resultados indicam que as amostras submetidas à maiores tempos de envelhecimento apresentaram picos mais intensos de austenita revertida, e segundo os resultados coletados através dos ensaios de corrosão realizados, apresentaram menor resistência à corrosão.

**Palavras-chave:** Aço Maraging. Austenita Revertida. Resistência à corrosão.

## ABSTRACT

Maraging steels are alloys with wide application in engineering and are steels that offer a unique combination of high mechanical strength and fracture toughness. Thus, its study is extremely important, so that the correct application of these materials in daily life is increasingly possible. The present work sought to study the influence of reversed austenite on the corrosion resistance of maraging steel 350 in an aqueous medium of 3.5% NaCl, under the conditions for different periods of thermal aging treatment (1 hour, 3 hours, 5 hours, 15 hours and 24 hours). In order to analyze the emergence of reversed austenite in the material, the samples were subjected to X-ray diffraction and to verify the effect of this phase on corrosion resistance, electrochemical polarization, electrochemical impedance and OCP tests were performed. The results indicate that the samples submitted to longer aging times presented more intense peaks of reversed austenite, and according to the results collected through the corrosion tests performed, they presented less resistance to corrosion.

**Keywords:** Maraging steel. Reversed Austenite. Corrosion resistance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Gráfico relação resistência à tração x tenacidade à fratura para diferentes aços.....	18
Figura 20	– Aço Maraging 350 envelhecido por (a) 510 °C por 3 horas (b) 640 °C por 2 horas (c) 640 °C por 8 horas e depois resfriadas ao ar.....	20
Figura 3	– Difratograma de amostras envelhecidas de aço maraging a 480 °C, durante: 12h. (a)   580 °C, durante: 12h. (b)   650 °C, durante: 12h. (c).....	24
Figura 4	– Diagrama de Nyquist.....	26
Figura 5	– Amostra esmaltada antes dos ensaios de corrosão.....	31
Figura 6	– Montagem da Célula Eletroquímica - a) Imagem teórica b)1. Contra eletrodo de platina, 2. Eletrodo de referência prata/cloreto de prata (Ag(s) / AgCl(s), sat. KCl) e 3. Eletrodo de trabalho (amostras utilizadas para análise) .....	32
Figura 7	– Bancada de realização dos ensaios de corrosão .....	32
Figura 8	– Simulação termodinâmica Temperatura (°C) x Fases (% de massa). TERMO-CALC TCW3.....	34
Figura 9	– Difratograma da amostra envelhecida a 570 °C, durante: 1h.....	35
Figura 10	– Difratograma da amostra envelhecida a 570 °C, durante: 3h.....	36
Figura 11	– Difratograma da amostra envelhecida a 570 °C, durante: 5h.....	36
Figura 12	– Difratograma da amostra envelhecida a 570 °C, durante: 15h.....	37
Figura 13	– Difratograma da amostra envelhecida a 570 °C, durante: 24h.....	37
Figura 14	– Variações dos potenciais de circuito aberto para as amostras de Aço Maraging 350 envelhecidas a 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas.....	39
Figura 15	– Curvas de polarização potenciodinâmica linear para diferentes amostras de Aço Maraging 350 envelhecidas a 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas.....	40
Figura 16	– Comparação das curvas EIE dos aços para diferentes amostras de Aço Maraging 350 envelhecidas a 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição química e resistência à tração nominal de diferentes graus dos aços maraging. Em destaque o Aço Maraging grau C350 que será evidenciado neste trabalho.....	17
Tabela 2	– Propriedades mecânicas dos aços maraging %18Ni das classes 200, 250, 300 e 350, sob condições de solubilização e solubilização com posterior envelhecimento.....	22
Tabela 3	– Composição nominal do Aço Maraging 350 em % de massa.....	28
Tabela 4	– Potenciais de corrosão e densidade de corrente para as amostras ensaiadas de Aço Maraging 350 envelhecidas a 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas.....	41

# Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivo Geral.....	15
2.2	Objetivos Específicos.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1	Aços Maraging .....	16
3.2	Austenita Revertida.....	18
3.3	Tratamento Térmico.....	21
3.4	Difração de Raios-X.....	22
3.5	Corrosão de Aços Maraging.....	24
3.6	Potencial de Circuito Aberto (OCP) .....	25
3.7	Espectrometria de Impedância Eletroquímica (EIE).....	25
3.8	Polarização Linear.....	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
4.1	Materiais.....	28
4.2	Metodologia .....	28
4.2.1	Simulação termodinâmica.....	28
4.2.2	Preparação das amostras .....	29
4.2.3	Tratamento Térmico .....	29
4.2.4	Preparação metalográfica das amostras .....	29
4.2.5	Difração de Raios-X .....	30
4.2.6	Ensaio Eletroquímico.....	30
4.2.7	Potencial de Circuito Aberto (OCP) .....	32
4.2.8	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) .....	33
4.2.9	Polarização Linear .....	33

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34
5.1	Simulação termodinâmica.....	34
5.2	Difração de Raios-X.....	34
5.3	Ensaio Eletroquímicos .....	38
5.4	Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto .....	38
5.5	Ensaio de Polarização.....	39
5.6	Ensaio de Impedância Eletroquímica.....	41
6	CONCLUSÃO .....	43
7	TRABALHOS FUTUROS.....	44
8	REFERÊNCIAS .....	45

## 1 INTRODUÇÃO

Durante a guerra fria, procurou-se desenvolver um bombardeiro que pudesse atingir velocidades supersônicas. Velocidades desta ordem em uma aeronave provocariam um aquecimento superficial devido ao atrito com o ar e a superfície desta aeronave atingiria temperaturas entre 250 e 300°C. Desta forma, ligas convencionais de alumínio não poderiam ser empregadas. O cenário, então, levou ao desenvolvimento de um aço inoxidável que pudesse ser empregado em painéis de *honeycomb* para reduzir peso, ao mesmo tempo em que este aço deveria possuir uma elevada relação resistência/peso. Isto foi obtido pela adição de pequenas quantidades de alumínio e titânio em aços inoxidáveis contendo Ni, [1] originando os aços Maraging.

Os aços maraging apresentam baixo teor de carbono e possuem uma estrutura cristalina martensítica cúbica de corpo centrado (CCC). Estes aços oferecem uma combinação de alta resistência mecânica e boa tenacidade à fratura. As excelentes propriedades mecânicas dos aços maraging são obtidas a partir da precipitação de compostos intermetálicos na matriz durante o tratamento térmico de envelhecimento. [2]

Esses materiais apresentam diferentes fases para diferentes tempos e temperaturas dos tratamentos térmicos realizados, além de mostrarem efeitos diferentes para cada tipo de elemento de liga que estiver em excesso ou deficiência, o níquel, por exemplo, possui importante efeito na transformação martensítica de baixo carbono, contudo em altos teores tende a estabilizar a austenita revertida.

O interesse da pesquisa pela reversão da austenita está associado às mudanças que esta transformação de fase pode acarretar nas propriedades mecânicas dos aços maraging após tempos prolongados de tratamento térmico de envelhecimento, também conhecida como superenvelhecimento. A presença de austenita revertida na microestrutura dos aços maraging altera significativamente as propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas desses aços, mesmo essa fase sendo muito instável. [3]

Mesmo com todas as excelentes propriedades mecânicas apresentadas pelos aços maraging, estes ainda apresentam poucos estudos em relação à sua resistência a corrosão.

Dessa maneira, é de suma importância o estudo dos aços maraging e sua resistência à corrosão, visto que são materiais que passam por diferentes etapas de tratamentos térmicos, e estas, realizadas de forma inadequada, podem viabilizar a construção da fase austenita revertida e precipitados ricos em níquel, que por sua vez podem ser desfavoráveis para a resistência à corrosão dos aços maraging.

Assim, o trabalho em questão, apresentará os resultados obtidos de ensaios de difração de raios-x para verificar a presença da fase austenita revertida de amostras de aços maraging grau 350 envelhecidas à 570°C para diferentes tempos de tratamentos térmicos, e realizar ensaios de corrosão em meio à solução de NaCl 3,5% para análise da influencia desta fase na resistência à corrosão do material.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar a influência da austenita revertida na resistência à corrosão do aço maraging 350 em meio aquoso de 3,5% NaCl.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Analisar a influência do tempo de envelhecimento na formação da austenita revertida no material.

Verificar através dos ensaios de difração de raio-x a intensidade dos picos da fase de austenita revertida gerados após aumento do tempo de tratamento térmico de envelhecimento.

Estudar a influência da austenita revertida na resistência à corrosão por intermédio dos ensaios de monitoramento potencial de circuito aberto, polarização potenciodinâmica e impedância eletroquímica.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este tópico abordará os aços Maraging em seu desenvolvimento e aplicações, bem como a metalurgia física, propriedades mecânicas e efeitos da adição dos principais elementos de liga na microestrutura e propriedades desses aços. Além disso, discute o tratamento térmico aplicado, as mudanças que ocorrem no seu interior com o surgimento da austenita revertida, quais os efeitos gerados nas propriedades e a corrosão encontrada nesses aços.

#### 3.1 Aços Maraging

Os aços maraging são ligas quaternárias Ni-Co-Mo-Ti com baixíssimos teores de carbono em sua microestrutura (<0,03%). O nome “maraging”, *martensite* e *aging*, termos em inglês que significam martensita envelhecida, já evidenciando o tratamento térmico praticado e a microestrutura que se espera.

O carbono é considerado uma impureza nestes aços e é mantido a baixos teores a fim de minimizar a formação de carboneto de titânio (TiC), que pode eventualmente afetar a resistência, a ductilidade e tenacidade [2].

A ocorrência de precipitação intermetálica contribui diretamente para o endurecimento desejado. A martensita dos aços Maraging de baixo carbono formada após a solubilização é relativamente mole, em torno de 30-35 RC, fazendo com que a temperabilidade dessa liga não seja um problema. Durante o endurecimento por envelhecimento, apenas pequenas alterações dimensionais ocorrem [8]. Com tais características, o aço Maraging apresenta boa usinabilidade pós-solubilização, onde apresentará dureza baixa seguido de envelhecimento, sofrendo mínimas deformações.

O desenvolvimento inicial desses aços foi feito por C.G. Bieber na *The International Nickel Company* no final dos anos 50. Este trabalho resultou nas primeiras duas graduações de aços maraging, os chamados aços 25% Ni e 20% Ni. Além de níquel, essas duas ligas continham 0,3 %Al, 1,4 %Ti e 0,4 %Nb, o qual resultou em endurecimento por precipitação de uma estrutura martensítica de baixo carbono quando envelhecida nas temperaturas de 425 °C a 510 °C. Ambas as ligas exibiam boas combinações de resistência e tenacidade em níveis de dureza de 53 a 56 HRC. No entanto,

essas ligas foram abandonadas por causa de sua fragilidade em níveis extremamente altos de resistência mecânica [7].

Em meados da década de 60, foram desenvolvidos aços maraging com níveis de resistência de 2100 MPa (300 Ksi), resultando no aço Maraging 350 18 Ni. Por causa da alta resistência dessa liga, ela foi designada como um aço maraging de ultra-alta resistência [9]. O aço Maraging 350 18 Ni será foco principal abordado neste trabalho. Em destaque na tabela 1, pode-se observar a composição química do mesmo. Esta liga é uma versão modificada do aço Maraging grau 300. Este contém teores maiores de titânio e cobalto além de quantidade reduzida de molibdênio.

Tabela 1 - Composição química e resistência à tração nominal de diferentes graus dos aços maraging. Em destaque o Aço Maraging grau C350 que será evidenciado neste trabalho.

Grau	Composição química (% peso)					Resistência à tração (MPa)
	Ni	Mo	Co	Ti	Al	
<b>Graus convencionais</b>						
<b>C200</b>	18	3,3	8,5	0,2	0,1	1400
<b>C250</b>	18	5,0	8,5	0,4	0,1	1700
<b>C300</b>	18	5,0	9,0	0,7	0,1	2000
<b>C350</b>	18	4,2	12,5	1,6	0,1	2400
<b>Graus livres de Co</b>						
<b>T200</b>	18,5	3,0	-	0,7	0,1	1400
<b>T250</b>	18,5	3,0	-	1,4	0,1	1700
<b>T300</b>	18,5	4,0	-	1,85	0,1	2000

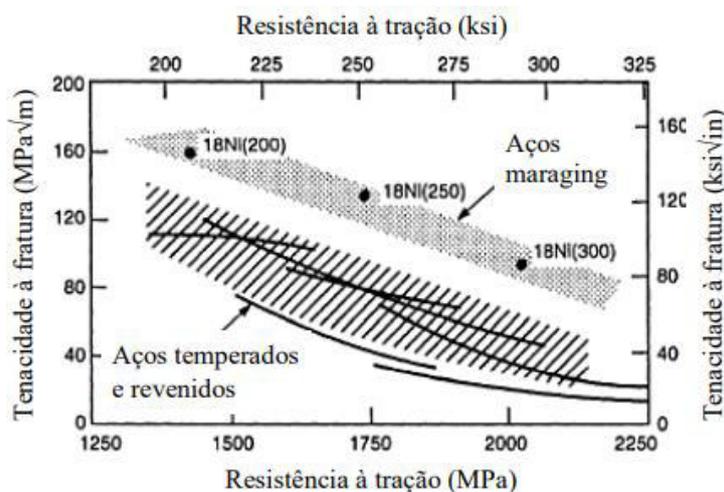
Fonte: Güiza Gabriel, 2015 (Adaptado).

Estes aços apresentam propriedades como elevada tenacidade à fratura e ultra-alta resistência mecânica, com limite de escoamento superior à 1000 MPa, e em estado de solubilização destacam propriedades como elevada tenacidade e ductilidade em consequência do tratamento térmico de envelhecimento onde observa-se uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado – CCC.

A relação custo-benefício dos aços maraging faz que eles sejam materiais estruturais para aplicações de alta sollicitação mecânica, onde o preço é um fator determinante [4]. A elevada resistência e flexibilidade do aço maraging, de possível análise através do gráfico relação resistência à tração x tenacidade à fratura para diferentes aços observado na Figura 1, o tornam um material ideal para a produção de conchas ou peles de mísseis balísticos e foguetes. Além de ser adequado para a fabricação de partes que passam por alta tensão expostas a rápidos ciclos térmicos, tais como os pinos de disparo das armas automáticas. A força e a maleabilidade da liga também a torna uma

boa pedida no campo da produção de pás para vedações. E ainda, esse tipo de aço é um material ideal para a fabricação de componentes de motores, tais como cambotas devido à sua resistência inerente [5].

Figura 1 - Gráfico relação resistência à tração x tenacidade à fratura para diferentes aços



Fonte: MAGNÉE et al., 1974

Apesar dos aços maraging apresentarem excelentes propriedades, estas são obtidas a um elevado custo [4]. Este custo é justificado pela necessidade de adicionar elementos de liga para a produção dos compostos intermetálicos, além disso, é crucial a realização de tratamentos térmicos a fim de promover a homogeneização da composição química, antecedendo à conformação mecânica.

Os aços maraging possuem um elevado teor de Ni, entre 10 e 30 %, sendo comum o emprego de teores de 13%Ni na série 400 ou de 18% Ni nas séries 200, 250, 300 e 350, este último abordado neste trabalho. O elevado teor de níquel estabiliza a austenita que após o tratamento térmico de envelhecimento, a partir de 560 °C, dependendo do tempo de tratamento térmico, forma-se a austenita reversa.

### 3.2 Austenita Revertida

A presença de austenita revertida na microestrutura dos aços maraging pode acarretar significativas mudanças nas propriedades mecânicas, magnéticas e elétricas desses materiais de acordo com a prolongação dos tempos de tratamentos térmicos de envelhecimento, também chamados de superenvelhecimento.

Estudos sugerem que a cinética de formação da austenita revertida é influenciada pelos teores de níquel, cobalto, molibdênio e titânio presentes na liga. Maiores teores de níquel e molibdênio aceleram a reversão, enquanto maiores teores de cobalto e titânio retardam [8].

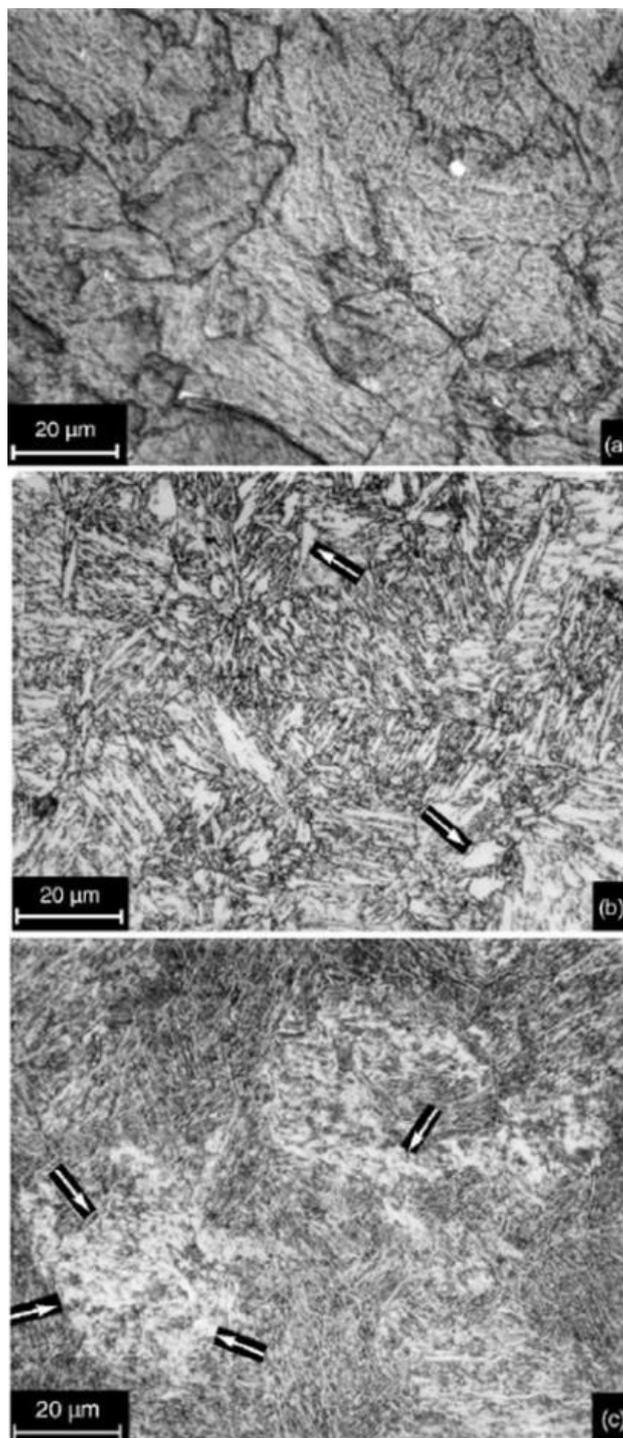
O processo para a formação da austenita revertida, de acordo com Sha, Cerezo e Smith [7], pode se dividir em três etapas no aço Maraging: na primeira, forma-se  $Ni_3Ti$  devido à alta difusividade de Ti e ao bom ajuste entre o precipitado e a matriz. Assim que formado, este intermetálico apresentará uma morfologia esferoidal, uma alta coerência com a matriz e um menor teor de Ti em relação ao especificado pela estequiometria. Na segunda etapa, os precipitados de  $Ni_3Ti$  vão crescendo em forma de barras. Do mesmo modo, o Ti da matriz vai migrar rapidamente para os precipitados, enquanto os átomos de Mo se difundem mais lentamente na mesma direção. Finalmente, o gradativo enriquecimento em Mo dos precipitados vai favorecer a formação de esferoides da fase  $\mu$  nas vizinhanças do  $Ni_3Ti$ . Por causa disso, o Mo presente neste intermetálico vai migrar progressivamente para a fase  $\mu$  e, para manter a estequiometria, a quantidade correspondente de Ni será liberada para a matriz. Este fenômeno promoverá a formação de austenita reversa em estágios avançados do envelhecimento [7].

Na Figura 2 (a), (b) e (c) estão imagens de uma amostra de aço maraging 350 estudado por Vishwanathan et. al. [4] que foram envelhecidas por diferentes temperaturas e tempos e em seguida resfriadas ao ar.

No estudo, para a temperatura de 510 °C não foi possível observar a presença de austenita revertida após envelhecimento, entretanto, para as amostras envelhecidas à temperatura de 640 °C foi possível verificar a presença da fase austenita na microestrutura para o tempo de 2 horas e 6 horas, como indica a Figura 2.

Assim, Vishwanathan, concluiu que a quantidade de austenita revertida cresce de maneira diretamente proporcional ao tempo de envelhecimento, o que se comprova ao observar as micrografias da Figura 2.

Figura 2 - Aço Maraging 350 envelhecido por (a) 510 °C por 3 horas (b) 640 °C por 2 horas (c) 640 °C por 8 horas e depois resfriadas ao ar.



Fonte: SHA; GUO, 2009.

Mesmo com sua alta instabilidade, o interesse pela austenita revertida além das mudanças mencionadas anteriormente, é comumente atribuído também ao enriquecimento de níquel da matriz cúbica de corpo centrado, esse enriquecimento geralmente está associado à dissolução de precipitados existentes aumentando o teor de Ni em solução sólida. Este aumento local do teor de Ni estabiliza a austenita mesmo à temperatura ambiente após o envelhecimento, dando origem à austenita revertida com consequente redução da resistência mecânica [5].

A reversão da austenita nos aços maraging é comumente atribuída ao enriquecimento de níquel da matriz CCC. Esse enriquecimento geralmente está associado à dissolução de precipitados do tipo  $Ni_3X$ , sendo  $X = Mo$  e  $Ti$  e à formação de compostos intermetálicos Fe-Mo durante o superenvelhecimento ( $Fe_7Mo_6$  ou  $Fe_2Mo$ ) [4].

Alguns pesquisadores observaram que a formação da austenita e dos precipitados  $Fe_2Mo$  ocorre aproximadamente ao mesmo tempo em que o níquel proveniente da dissolução do  $Ni_3(Mo,Ti)$  seria usado para formar a austenita revertida e molibdênio, usado para formar  $Fe_2Mo$  [5]. Contudo, foi mostrado que o precipitado  $Ni_3Mo$  é mais instável termodinamicamente que o precipitado  $Ni_3Ti$ . Dessa forma, é mais provável que a dissolução do precipitado  $Ni_3Mo$  dê origem à austenita revertida e aos precipitados Fe-Mo simultaneamente [8].

Além da presença de precipitados grossos com tempos prolongados de envelhecimento ou temperatura mais alta, a austenita revertida pode apresentar mudanças de morfologia com o aumento da temperatura e do tempo de superenvelhecimento [5].

### 3.3 Tratamento Térmico

Os principais tratamentos térmicos realizados para o tipo de aço estudado são a solubilização e o envelhecimento. O endurecimento das ligas dos aços maraging é realizado por meio do tratamento térmico de envelhecimento na maioria das vezes à temperatura de  $480^{\circ}C$  por um tempo de 3 a 6 horas seguido de um resfriamento ao ar. Porém os tempos de tratamento térmico de envelhecimento podem variar de acordo com a série do material [2].

O superenvelhecimento ou *overaging* pode ocorrer devido às elevadas temperaturas de envelhecimento e/ou ao elevado tempo deste tratamento térmico. No

*overaging* ocorre coalescimento do precipitado e conseqüentemente, perda de resistência mecânica, além disto, pode ocorrer a formação de Fe<sub>2</sub>Mo a partir dos precipitados. Este aumento local do teor de Ni em solução sólida estabiliza a austenita mesmo à temperatura ambiente após o *overaging*. Esta austenita é chamada de “austenita revertida” com conseqüente redução da resistência mecânica [5].

Vários parâmetros microestruturais dos precipitados dos aços maraging parecem controlar as propriedades mecânicas. A presença de partículas endurecedoras, tensões de coerência e diferenças menores de fração volumétrica apresentam grande influência, mas o fator principal é atribuído ao tamanho extremamente fino do precipitado [8]. A Tabela 2 ilustra as características mecânicas das diferentes classes de aços maraging sob as condições solubilizada e solubilizada e envelhecidas.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos aços maraging %18Ni das classes 200, 250, 300 e 350, sob condições de solubilização e solubilização com posterior envelhecimento

Propriedade	Condição	18 Ni 200	18 Ni 250	18 Ni 300	18 Ni 350
Tensão de Escoamento (MPa)	Solubilizada	800	800	790	830
	Solubilizada e Envelhecida	1310 - 1550	1650 - 1830	1790 - 2070	2390
Limite de Resistência (MPa)	Solubilizada	1000	1010	1010	1150
	Solubilizada e Envelhecida	1340 - 1590	1690 - 1860	1830 - 2100	2460
Alongamento (%)	Solubilizada	17,0	19,0	17,0	18,0
	Solubilizada e Envelhecida	6,0 – 12,0	6,0 – 10,0	5,0 – 10,0	8,0
Redução em Área (%)	Solubilizada	79,0	72,0	76,0	70,0
	Solubilizada e Envelhecida	35,0 – 67,0	35,0 – 60,0	30,0 – 50,0	36,0

Fonte: SCHMITT, 2014 (Adaptado).

Os dois mecanismos de endurecimento responsáveis pela resistência mecânica dos aços maraging no estado solubilizado são: os elementos de liga medidos pela composição química responsável pelo endurecimento por solução sólida e a reação martensítica que acontece nos aços maraging contribuindo para o aumento da resistência mecânica através da geração de uma alta densidade de discordância [9].

### 3.4 Difração de Raios-X

Esta técnica consiste em aplicar uma radiação com um comprimento de onda conhecido sobre o material estudado, para realizar a identificação de estruturas cristalinas

internas. A difração de raios-X é uma técnica não destrutiva, que utiliza o comprimento de onda da ordem do tamanho do espaçamento entre os átomos em uma estrutura cristalina.

Utiliza-se a lei de Bragg para descrever o fenômeno da ocorrência da difração de raios-X.

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \text{Sen } \theta$$

Onde,

$n$  = Ordem de reflexão

$\lambda$  = Comprimento de onda incidente

$d$  = Distância interplanar de átomos

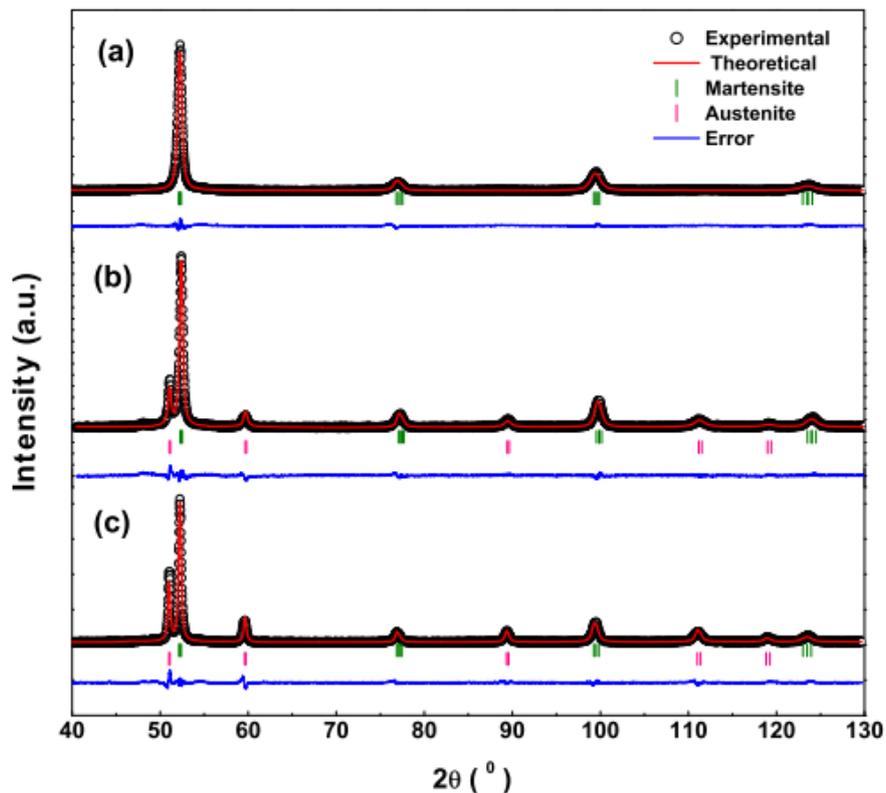
$\theta$  = Ângulo de desvio do feixe incidente

Segundo G.C.S. Nunes et al. [19], o aumento crescente do tempo de envelhecimento influencia significativamente a formação da austenita revertida no Aço Maraging 350, estudado neste trabalho. A figura 3 trata do difratograma de amostras envelhecidas de aço maraging a 480 °C, durante: 12h. (a) | 580 °C, durante: 12h. (b) | 650 °C, durante: 12h. (c).

Observa-se para 480 °C por 12 h (Figura 3a) é análogo ao do aço recozido em solução e é característico de uma amostra monofásica, correspondendo à estrutura da martensita para as amostras recozidas a 480 °C por 3 e 6 horas resultados observado nenhum pico extra pôde ser identificado, o que significa que nenhuma fase secundária precipitou na amostra em quantidades significativas (ou seja, dentro dos limites de resolução de técnica de difração de raios-X).

Em contraste, o difratograma da amostra envelhecida a 580 °C por 12 h (Figura 3b), temperatura próxima a que foi utilizada no estudo deste trabalho, mostra picos de uma fase secundária, que por sua estrutura (CFC) pode ser identificada como sendo a austenita. Esta fase é encontrada factualmente em aços Maraging-350 envelhecidos ou apenas recozidos. A amostra envelhecida a 580 °C por 12 h (Figura 3c), é mais ou menos constante, à medida que a temperatura aumenta para tratamentos de envelhecimento. [19]

Figura 3 - Difratoograma de amostras envelhecidas de aço maraging a 480 °C, durante: 12h. (a) | 580 °C, durante: 12h. (b) | 650 °C, durante: 12h. (c)



Fonte: Maraging-350 steel: Following the aging through diffractometric, magnetic and hyperfine analysis.

### 3.5 Corrosão de Aços Maraging

A corrosão em um aço se dá pela deterioração dos materiais pela ação química ou eletroquímica do meio. No Processo de corrosão, os metais reagem com elementos não-metálicos presentes no meio (oxigênio, enxofre, etc.) produzindo compostos semelhantes aos encontrados na natureza, dos quais foram extraídos. Dessa forma, conclui-se que, a corrosão corresponde ao inverso do processo metalúrgico [17].

A exposição atmosférica dos aços maraging 18Ni leva a uma corrosão do tipo generalizada. Em 1996, Bellager e Rameau realizaram um experimento para estudar as consequências de uma solução em pH parcialmente ácido, com ou sem cloreto em água radioativa, na corrosão do aço maraging e puderam mostrar que o comportamento corrosivo desse grupo no quesito corrosão depende do pH intermediário da reação anódica formado na superfície do aço maraging que favorece a passividade [23].

Bellager observou que o potencial de corrosão do aço maraging não depende da concentração de carbonato em um pH alcalino. Foi observado também que, em potenciais transpassivos, para lentas e rápidas velocidades de varredura, o comportamento do aço maraging mostra-se diferente. Para um dado material soldado, o estudo eletroquímico do aço maraging 18Ni grau 250 em meio de ácido sulfúrico mostrou que a velocidade de corrosão é influenciada pela concentração de  $H_2SO_4$  e o aumento da temperatura, revelando que o aço na condição solubilizada tem sua resistência à corrosão elevada com o aumento dos parâmetros investigados [12].

Foram realizados experimentos em aço maraging grau 250 envelhecidos e soldados em meio de HCl e em meio  $H_3PO_4$ . A velocidade de corrosão do aço maraging nesses dois meios é bastante elevada e aumenta com a concentração e a temperatura da solução de HCl [12].

Na literatura existem poucos estudos disponíveis que revela o comportamento de resistência à corrosão do aço maraging grau 350, dessa forma, esse trabalho abordará a influência da austenita revertida na resistência à corrosão do aço maraging grau 350 em meio aquoso de 3,5% NaCl.

### **3.6 Potencial de Circuito Aberto (OCP)**

No método da evolução de potencial, também chamado de curva de estabilização de potencial de circuito aberto (*OCP – Open Circuit Potential*), mede-se a variação do potencial com o tempo na interface metal/solução, em relação a um eletrodo de referência, obtendo-se uma curva potencial vs. tempo. Assim, enquanto houver dissolução do metal, o potencial medido deve variar; porém, quando se atinge um estado de passivação ou quando o processo de corrosão for controlado por difusão, o potencial deverá manter-se constante [13;14].

### **3.7 Espectrometria de Impedância Eletroquímica (EIE)**

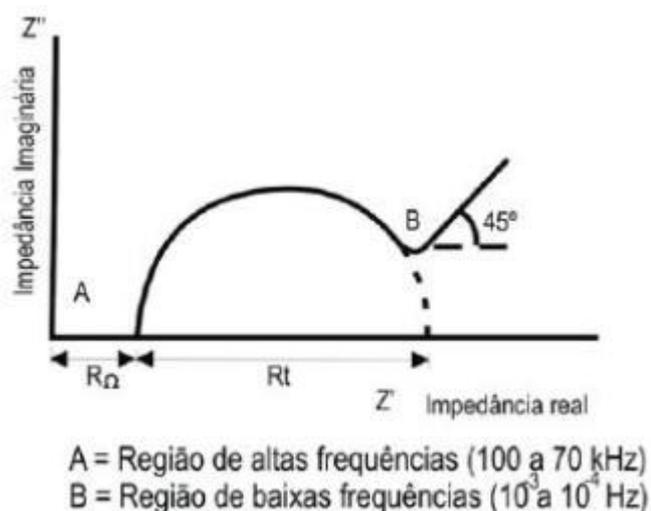
O princípio desta técnica consiste em aplicar um sinal alternado de pequena amplitude (5 a 20 mV) a um eletrodo inserido num eletrólito. Compara-se, então, a perturbação inicial (aplicada) com a resposta do eletrodo, pela medida da mudança de fase dos componentes de corrente e voltagem e pela medida de suas amplitudes. Isso pode

ser feito nos domínios de tempo ou nos domínios de frequência, utilizando-se um analisador de espectro ou um analisador de resposta de frequência, respectivamente [15].

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) é uma técnica que trabalha no domínio de frequência. O conceito básico envolvido em EIE é que uma interface pode ser vista como uma combinação de elementos de circuito elétricos passivos, isto é, resistência, capacitância e indutância. Quando uma corrente alternada é aplicada a esses elementos, a corrente resultante é obtida usando a lei de Ohm [15].

O diagrama de Nyquist, Figura 4, consiste em uma série de pontos, cada um representando a grandeza e a direção do vetor de impedância para uma frequência em particular. Uma vez construído o diagrama de Nyquist, faz-se a extrapolação da parte direita do semicírculo até encontrar o eixo horizontal. O diâmetro do semicírculo é a resistência à transferência de carga  $R_t$ , equivalente à resistência de polarização ( $R_p$ ). Assim, quanto maior o diâmetro deste semicírculo, maior a resistência  $R_p$ , conseqüentemente, menor a taxa de corrosão [16].

Figura 4 - Diagrama de Nyquist



### 3.8 Polarização Linear

Esta técnica consiste na aplicação de pequenas variações de potencial da ordem de  $\pm 10$  mV em torno do potencial de corrosão do metal, para que se obtenham respostas em corrente o mais linear possível. O objetivo desta técnica é medir a resistência que um dado material, exposto a determinado meio oferece à oxidação durante a aplicação de um potencial externo e conseqüentemente fornecendo taxas de corrosão instantânea de metais

expostos aos eletrólitos. Deste modo, aplicando-se pequenos potenciais em torno do potencial de corrosão e medindo-se as correntes associadas.[6]

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Materiais

O material utilizado para a realização deste trabalho foi o Aço Maraging 18% Ni da classe 350 cedido pelo Laboratório de Caracterização de Materiais da UFC (LACAM). A Tabela 3 mostra a composição química da liga metálica em questão.

Tabela 3 – Composição nominal do Aço Maraging 350 em % de massa

<b>Ni</b>	<b>Co</b>	<b>Mo</b>	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	<b>Fe</b>
<b>17,66</b>	11,65	4,69	0,065	1,44	Bal

Fonte: Fabricante do aço.

### 4.2 Metodologia

A metodologia empregada para a elaboração deste trabalho está descrita na sequência abaixo:

- Etapa 01: Estudo termodinâmico do Aço Maraging 350 através de simulações de Thermo-Calc
- Etapa 02: Solubilização das amostras a 820°C por 1 hora e corte das amostras.
- Etapa 03: Envelhecimento das amostras a 570°C por 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas, e 24 horas.
- Etapa 04: Caracterização metalográfica das amostras para realização das etapas 05 e 06.
- Etapa 05: Raio-X das amostras para detecção da austenita reversa
- Etapa 06: Ensaio de corrosão: Potencial de Circuito Aberto (OCP), polarização linear e impedância das amostras envelhecidas.

#### 4.2.1 Simulação termodinâmica

Com o intuito de conhecer a temperatura de solubilização e de envelhecimento do material, utilizando o software ThermoCalc®, foi feito um diagrama Temperatura x Fases (% de massa). O ThermoCalc® é um software de termodinâmica computacional flexível que possui pacotes de base de dados para diversos tipos de fases em equilíbrio,

diagramas de fase, cálculos de transformação de fases e avaliações termodinâmicas utilizando como base o método CALPHAD (Cálculo Computacional de Diagramas de Fases). [22].

O ThermoCalc® se torna uma importante ferramenta no desenvolvimento de novos materiais, permitindo uma redução de experimentos e consequentemente de tempo necessários para se obter os resultados desejados.

#### **4.2.2 Preparação das amostras**

O material utilizado neste estudo foi recebido em forma de lingote, na dimensão de aproximadamente 8x5x6 cm. Foram realizados diversos cortes utilizando a máquina de corte *Cut-off* dispondo de um disco abrasivo de carbetto de silício, no Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem (LPTS) da Universidade Federal do Ceará (UFC). para a obtenção de amostras de aproximadamente 10x10 mm. Após a finalização dos cortes, três amostras para cada parâmetro de tempo foram separadas para posterior realização do tratamento térmico de solubilização das amostras à 820 °C por 1 hora no forno mufla no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

#### **4.2.3 Tratamento Térmico**

Após a etapa de solubilização das amostras de aço *maraging* 350, foram separadas 3 amostras para cada parâmetro de tempo de 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas, e 24 horas para o tratamento térmico de envelhecimento na temperatura de 570°C e resfriadas ao ar. Para cada condição de tempo foram utilizadas três amostras. Essa metodologia foi escolhida com o intuito de analisar a influência do aumento do tempo do tratamento térmico de solubilização na formação da austenita revertida no material.

#### **4.2.4 Preparação metalográfica das amostras**

Após a etapa de solubilização das amostras de aço *maraging* 350, foi realizado em cada uma delas o procedimento convencional de metalografia com lixamento em politriz seguindo a granulação de 80#, 100#, 220#, 320#, 400#, 600# com fluxo contínuo de água e em seguida lavadas com água destilada e álcool e secadas com jato de ar quente

imediatamente após lixamento. Em seguida deu-se início a etapa de realização do Raio-X.

#### **4.2.5 Difração de Raios-X**

Foi utilizada uma técnica não destrutiva, difração de raio-x, com o objetivo de detectar a presença da austenita revertida, foram realizadas análises por difração de raios-x (DRX) nas amostras. As amostras foram uma a uma posicionadas no difratômetro PHILIPS modelo X'PERT PRO do Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Ceará (UFC) utilizando como fonte de radiação o  $\text{CoK}\alpha$  de comprimento de onda de 1,7889 nm. O intervalo angular  $2\theta$  utilizado variou de  $50^\circ$  a  $54^\circ$ . O passo angular foi de 0,005 graus por varredura e o tempo de contagem foi de 1 segundo.

Este procedimento foi realizado para cada parâmetro de tempo de 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas, e 24 horas de tempo de envelhecimento na temperatura de  $570^\circ\text{C}$ .

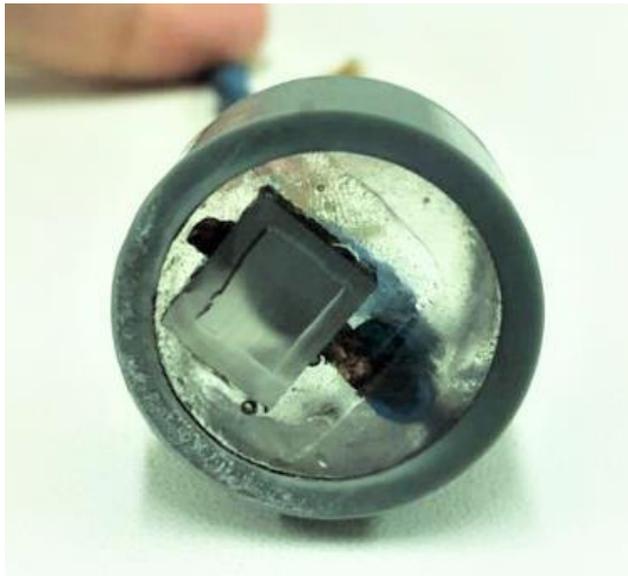
#### **4.2.6 Ensaios Eletroquímicos**

As técnicas para a realização dos ensaios eletroquímicos realizadas foram: Potencial de Circuito Aberto (OCP), polarização linear e impedância das amostras envelhecidas.

Para as medidas realizadas, utilizou-se um potenciostato/galvanostato modelo PGSTAT30 (Autolab, Metrohm-Eco Chemie) do Laboratório de Pesquisa em Corrosão (LPC) da UFC juntamente com o software Nova 2.1.2.

Após realização dos ensaios de Raio-X, as amostras foram embutidas em resina epox para posterior lixamento progressivo em lixas d'água de granulometrias 80, 100, 220, 320, 400 e 600 até que suas superfícies não apresentassem planos, em seguida, com o intuito de evitar que a solução de NaCl utilizada nos ensaios de corrosão não penetrasse nos poros da resina e evitar corrosão por frestas, as amostras foram esmaltadas deixando em média uma área exposta de  $0,40\text{ cm}^2$  para contato com a solução NaCl em cada corpo de prova, como ilustra a Figura 5 abaixo.

Figura 5 – Amostra esmaltada antes dos ensaios de corrosão.



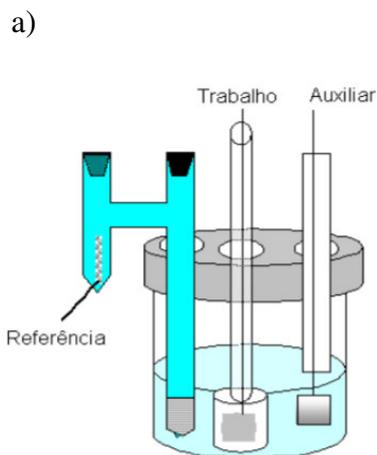
Fonte: Própria autora

Uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos foi utilizada na realização do estudo, sendo os eletrodos: 1. Contra eletrodo de platina, 2. Eletrodo de referência prata/cloreto de prata ( $\text{Ag(s)} / \text{AgCl(s)}$ , sat.  $\text{KCl}$ ) e 3. Eletrodo de trabalho (amostras utilizadas para análise), como representado na Figura 6. Como eletrólito utilizou-se uma solução aquosa de 3,5%  $\text{NaCl}$ .

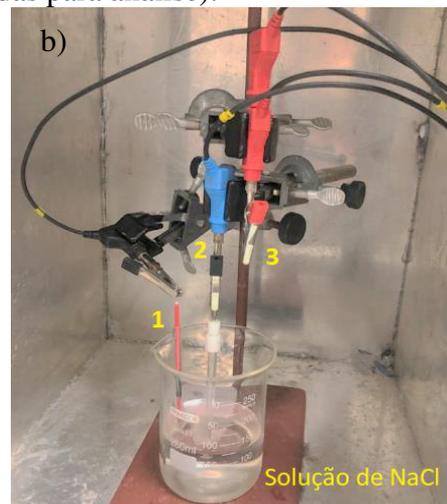
Para a realização dos ensaios, a célula eletroquímica foi fixada dentro de uma gaiola de Faraday com o objetivo de minimizar interferências externas. Na sequência, as áreas superficiais de cada amostra foram medidas após a realização dos ensaios eletroquímicos obtendo uma média das áreas de aproximadamente  $0,413 \text{ cm}^2$

Os ensaios foram realizados em temperatura ambiente e em triplicatas, a fim de garantir a replicabilidade dos resultados.

Figura 6 – Montagem da Célula Eletroquímica - a) Imagem teórica b) 1. Contra eletrodo de platina, 2. Eletrodo de referência prata/cloreto de prata (Ag(s) / AgCl(s), sat. KCl) e 3. Eletrodo de trabalho (amostras utilizadas para análise).



Fonte: Cardoso, 2011



Fonte: própria autora

Figura 7 - Bancada de realização dos ensaios de corrosão



Fonte: Própria autora

#### 4.2.7 Potencial de Circuito Aberto (OCP)

Antes dos ensaios de polarização, as amostras foram mergulhadas na solução por meia hora para determinar o potencial de circuito aberto (OCP). Durante esse tempo, não se aplica nenhum tipo de potencial nem de corrente, ou seja, o sistema está parado e não

existe influência externa do aparelho na amostra para que assim, o sistema entre em equilíbrio juntamente os eletrodos e a solução, com o objetivo de que o software AutoLab registra qual o potencial que está resultando o sistema.

#### **4.2.8 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)**

Para esse ensaio, foi utilizada a técnica de EIE com o objetivo de analisar o comportamento do sistema metal/filme de óxido/solução.

Utilizando a mesma célula de 3 eletrodos dos ensaios anteriores, realizou-se, por meio de uma varredura de frequência utilizando 51 pontos distribuídos, as medições em uma faixa de frequência de 50 kHz – 10 mHz. Foi utilizada uma onda senoidal com amplitude de 15 mV.

#### **4.2.9 Polarização Linear**

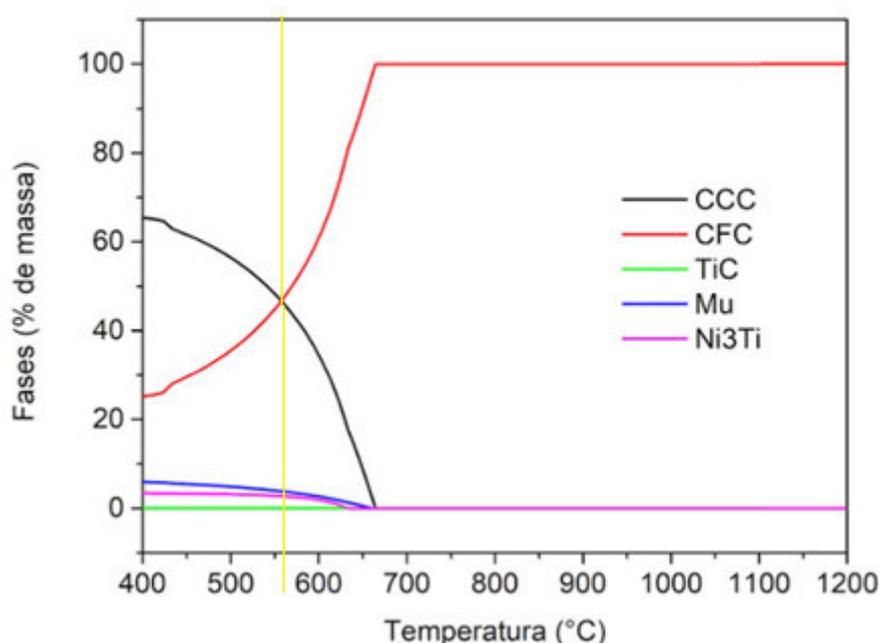
A varredura das curvas de polarização potenciodinâmica foi de -0,62 V a -0,15 V com uma taxa de varredura de 1 mV/s, iniciando após 30 minutos de imersão no OCP para cada amostra. Os ensaios finalizavam quando a densidade de corrente atingia valores superiores a 1 mA/cm<sup>2</sup>.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Simulação termodinâmica

O diagrama de fases gerado através do software Thermo-Calc® para o aço maraging 350 a partir da composição química descrita na Tabela 3, pode ser analisado na Figura 8. De acordo com o gráfico, observa-se que a temperatura de solubilização ideal para o aço maraging 350 é a partir de 700 °C, e por este motivo, o presente trabalho foi desenvolvido utilizando a temperatura de 820 °C para que dessa forma, seja realizada a total solubilização do material em estudo. Já a temperatura de envelhecimento selecionada é a de 570 °C, pois segundo a simulação termodinâmica, há presença do composto Ni<sub>3</sub>Ti que confere uma maior resistência mecânica a esse material.

Figura 8 – Simulação termodinâmica Temperatura (°C) x Fases (% de massa). TERMO-CALC TCW3



Fonte: elaborada pela autora.

### 5.2 Difração de Raios-X

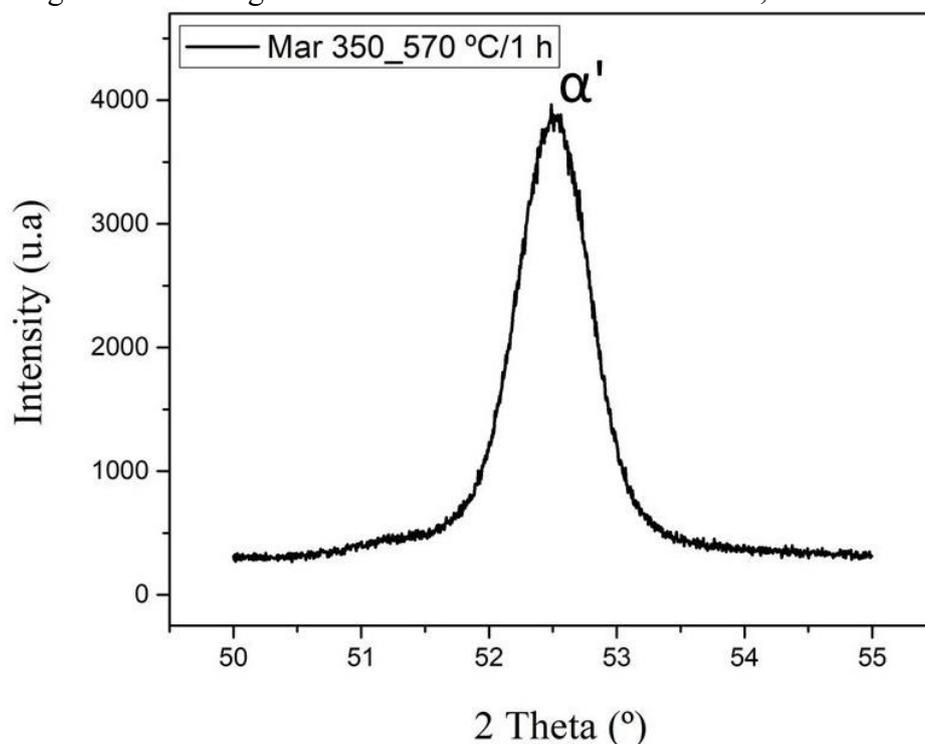
Da Figura 9 a Figura 13 estão mostrados os difratogramas dos corpos de prova estudadas com o resultado obtido para difração de raios-X nas amostras envelhecidas a 570°C por 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas, e 24 horas resfriadas ao ar e utilizando fonte de radiação de cobalto com comprimento de onda de 1,7889 nm.

De acordo com G.C.S. Nunes et al [19], os resultados após envelhecimento do aço maraging 350 para temperaturas maiores que 500 °C após longos períodos de tempo, apresentam a formação de austenita revertida em decorrência da dissolução de Ni<sub>3</sub> (Ti, Mo), por serem os elementos com o maior raio atômico. Assim, os resultados obtidos neste trabalho, confirmam o que retrata a literatura, comprovando que com o aumento do tempo de tratamento térmico, o teor de austenita revertida aumenta. O ângulo 2θ para a martensita é 52,5° e o ângulo para a fase austenita é 51, 2°.

É possível observar que para o tratamento térmico de 1 hora não há pico de austenita revertida, podendo-se verificar o surgimento e o aumento progressivo da intensidade do pico da austenita revertida ( $\lambda$ ), com o aumento do tempo de tratamento térmico de envelhecimento, ao lado esquerdo do pico da martensita ( $\alpha'$ ).

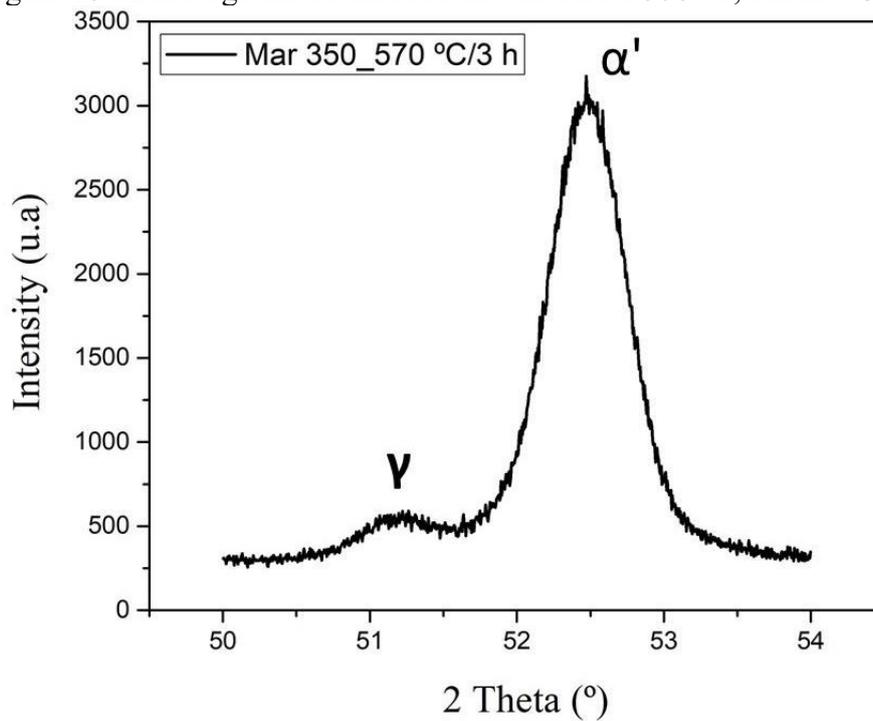
O pico da austenita corresponde ao plano (111) e o pico da martensita encontrado corresponde ao plano (110).

Figura 9 - Difratoograma da amostra envelhecida a 570 °C, durante: 1h.



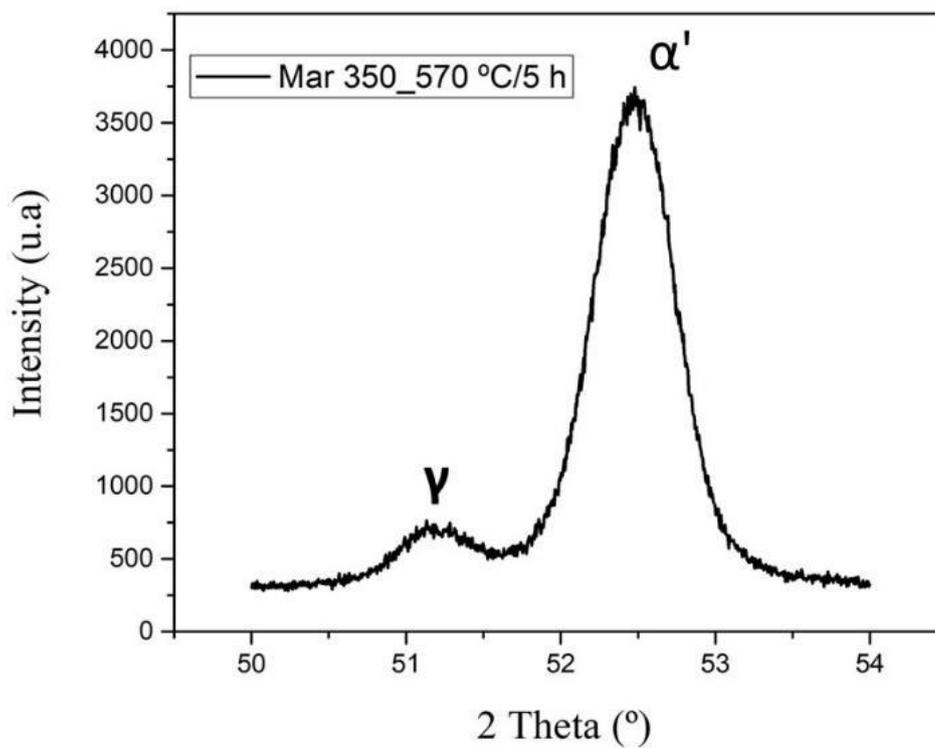
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 10 - Difratoograma da amostra envelhecida a 570 °C, durante: 3h.



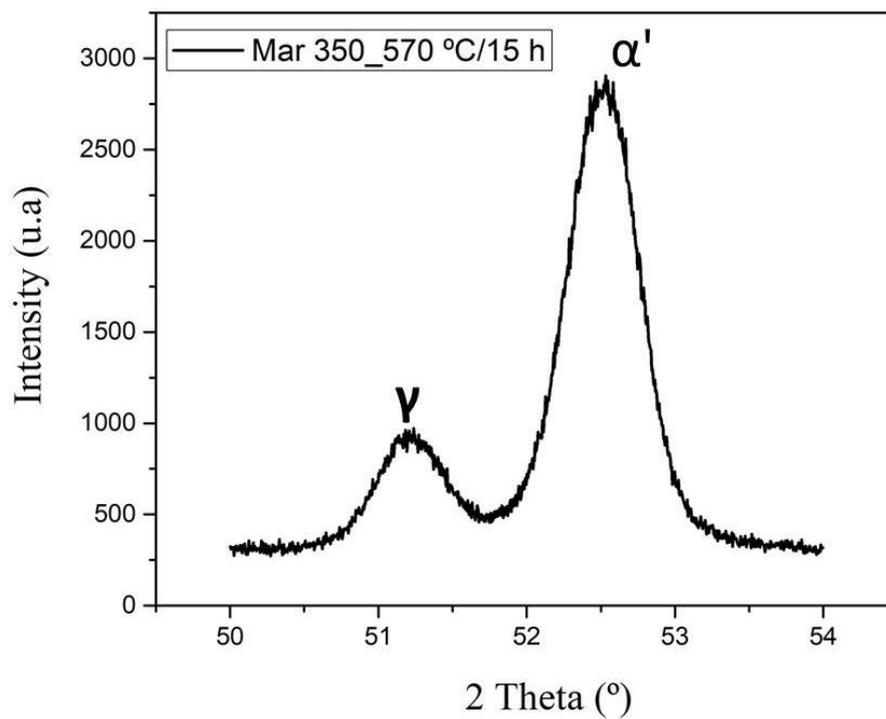
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 11 - Difratoograma da amostra envelhecida a 570 °C, durante: 5h.



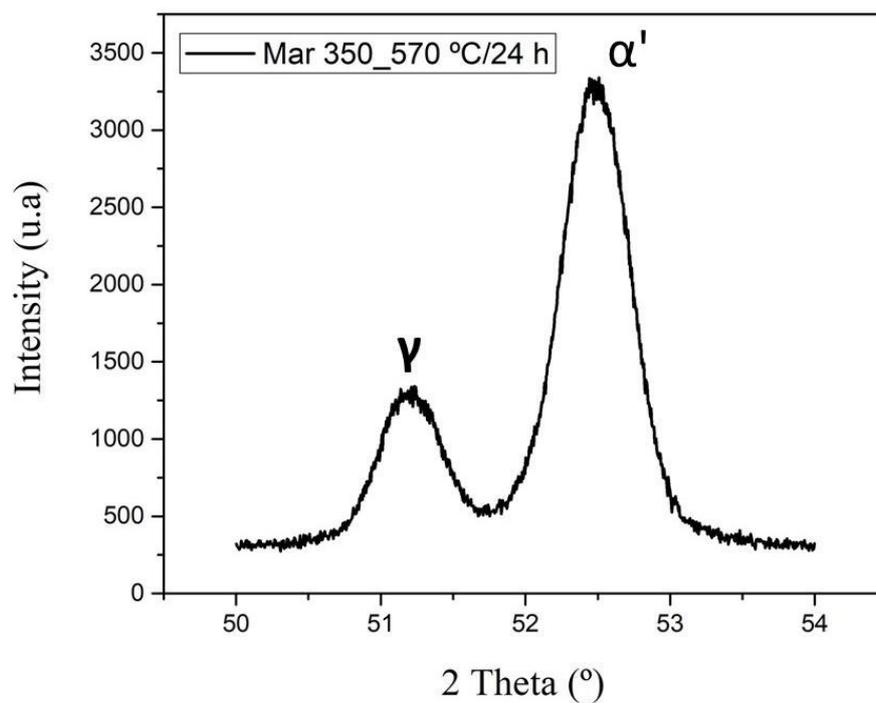
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 12 - Difratoograma da amostra envelhecida a 570 °C, durante: 15h.



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 13 - Difratoograma da amostra envelhecida a 570 °C, durante: 24h.



Fonte: elaborada pela autora.

### 5.3 Ensaio Eletroquímicos

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios de monitoramento potencial de circuito aberto, polarização potenciodinâmica e impedância eletroquímica.

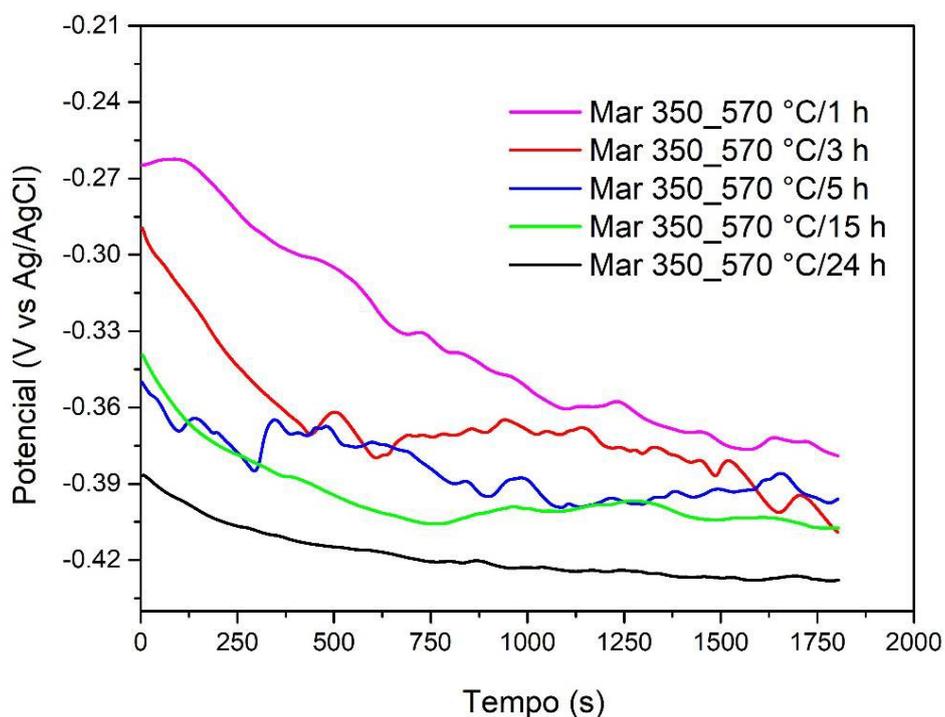
### 5.4 Monitoramento do Potencial de Circuito Aberto

A Figura 14 mostra o gráfico de monitoramento do potencial de circuito aberto para as amostras de aço maraging 350 envelhecidas por 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas em solução de 3,5% NaCl. Pelo do gráfico gerado, é possível perceber que a após 1800 segundos de ensaio, o potencial estabilizou e a solução atingiu o equilíbrio

Foi observado que para algumas amostras, dependendo do tempo de tratamento térmico submetido, apresentaram mais facilidade na estabilização do potencial de circuito aberto. As amostras de 5 horas, 15 horas e 24 horas de envelhecimento, entre 750 e 1000 segundos de ensaio, apresentam seus potenciais bastante estáveis quando comparando-se com o resultado final, se estabilizando mais rapidamente, diferente da amostra de 1 hora e 3 horas de tratamento, pois fazendo a mesma comparação anterior, para 750 segundos de ensaio, ainda não era possível observar que o potencial estava próximo ao resultado do OCP final.

Visto que quanto menor o valor do OCP, ou seja, quanto mais negativo este for, existe uma maior tendência para que o material sofra um processo de oxidação, uma vez que isso é apenas indicativo termodinâmico, poderá ser possível analisar esta inclinação após os resultados obtidos com o ensaio de polarização, este por sua vez, poderá reafirmar, através dos valores de potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão, a correlação entre a presença da fase austenita revertida e a resistência à corrosão do material.

Figura 14 - Variações dos potenciais de circuito aberto para as amostras de Aço Maraging 350 envelhecidas a 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas.



## 5.5 Ensaio de Polarização

A resistência à polarização é um método de monitoramento da taxa de corrosão e indica a resistência à corrosão de materiais em meios aquosos [20].

A Figura 15 mostra as curvas de polarização potenciodinâmica referente as amostras de aço maraging 350 envelhecidas por 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas em solução de 3,5% NaCl, estudadas neste trabalho.

Quanto maior a resistência à polarização, mais difícil o material sofrer corrosão, pois polarizar o material, é tirá-lo do seu ponto de equilíbrio e movê-lo para outro potencial. Após alterar o potencial do material, o mesmo sofre o processo de corrosão, ou seja, se há pela amostra maior resistência a essa mudança, significa que ele é mais resistente à corrosão para a solução de 3,5% NaCl.

Para este estudo, pode-se observar uma relação entre o tempo de tratamento térmico de envelhecimento e a densidade de corrente, onde através dos valores de

densidade de corrente, é possível identificar se a superfície analisada é mais ou menos ativa que outra, ou seja, mais passível ou não de sofrer corrosão.

Observa-se que as amostras que foram submetidas a um tratamento térmico mais prolongado apresentaram uma maior densidade de corrente e menor potencial, logo apresentam uma maior taxa de corrosão. Com isso, é possível perceber que quanto maior o tempo de tratamento térmico o material for exposto, menos nobre é a amostra pela diminuição do potencial, fora isso, a corrente de corrosão é mais alta para as amostras com maior tempo, isso quer dizer que para tratamentos mais longos no aço maraging 350, maior a facilidade deste sofrer corrosão. A amostra envelhecida por 1 h apresentou o maior potencial e a menor densidade de corrente. Já a amostra envelhecida por 24 h apresentou o menor potencial e a maior densidade de corrente, indicando que a mesma foi a menos resistente ao meio corrosivo em relação às demais. Essa baixa resistência à corrosão para a amostra envelhecida durante 24 horas pode estar relacionada à precipitação de austenita reversa durante o envelhecimento, conforme já mostrados nos gráficos de XRD. Na tabela 4, estão os valores de potencial de corrosão e densidade de corrente de corrosão para as amostras ensaiadas.

Figura 15 - Curvas de polarização potenciodinâmica linear para diferentes amostras de Aço Maraging 350 envelhecidas a 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas.

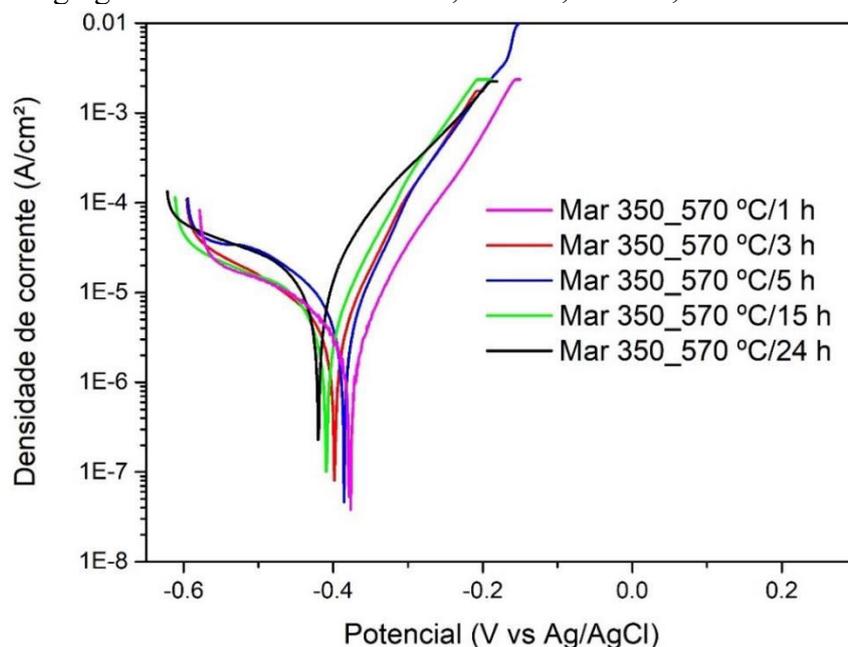


Tabela 4 – Potenciais de corrosão e densidade de corrente para as amostras ensaiadas de Aço Maraging 350 envelhecidas a 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas.

<b>Aço Maraging 350 envelhecido 570 °C</b>		
<b>Tempo</b>	<b>Ecorr (V vs Ag/Cl)</b>	<b>I corr (A/cm<sup>2</sup>)</b>
1	-0,37	1,42E-06
3	-0,40	5,54E-06
5	-0,38	2,29E-06
15	-0,41	2,88E-06
24	-0,42	6,21E-06

Fonte: elaborada pela autora.

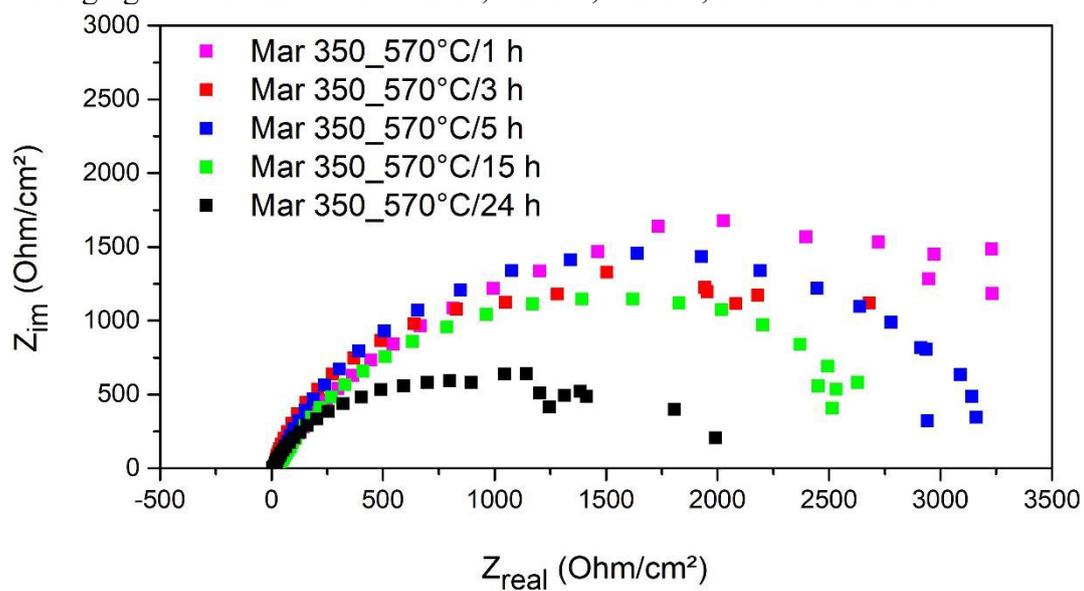
## 5.6 Ensaio de Impedância Eletroquímica

A Figura 16 mostra o diagrama de Nyquist que representa o comportamento das amostras durante o ensaio de EIE para o Aço Maraging 350 para os diferentes tempos de envelhecimento usados.

Para o estudo em questão, deve ser observado o tamanho diâmetro do semicírculo gerado após finalização do ensaio, pois quanto maior o arco, maior é a resistência à corrosão pelo material.

Dessa maneira, analisando o diagrama e comparando os aços entre si, observa-se que para a amostra que sofreu tratamento térmico de 1 hora, seu arco apresenta-se maior quando comparado com as demais amostras que passaram por tratamento de envelhecimento por tempos mais prolongados sendo possível verificar que quanto menor o tempo de tratamento, maior o tamanho do diâmetro do semicírculo, indicando que o tempo do tratamento térmico impacta diretamente na resistência à corrosão do Aço Maraging 350 reafirmando os resultados obtidos pelas curvas de polarização. Quanto maior o tempo de envelhecimento na temperatura de 570 °C, maior é a chance de formação da austenita reversa. Essa impacta diretamente na resistência à corrosão de aços Maraging.

Figura 16 - Comparação das curvas EIE dos aços para diferentes amostras de Aço Maraging 350 envelhecidas a 1 hora, 3 horas, 5 horas, 15 horas e 24 horas.



## 6 CONCLUSÃO

Diante aos resultados obtidos neste trabalho, primeiramente foi possível concluir, após observação dos picos de austenita que surgiram através dos resultados de raio X, para o comprimento de onda de 1,7889 nm utilizado, que à medida que o tempo de tratamento térmico de envelhecimento aumentava (1 hora, 3 horas 5 horas, 15 horas e 24 horas) com posterior resfriamento ao ar, a quantidade de austenita revertida no material também crescia, e segundo os ensaios eletroquímicos realizados, este resultado influenciou na resistência à corrosão do material, observando que em temperaturas maiores que 500°C e após longos períodos de tempo, é possível verificar o crescente surgimento da austenita reversa no material.

Através dos ensaios eletroquímicos realizados (potencial de circuito aberto, polarização potenciodinâmica e impedância eletroquímica), foi possível verificar que a resistência a corrosão do Aço Maraging 350 foi afetada para as amostras com maiores tempos de tratamento.

Para os resultados do OCP, tem-se que quanto mais negativo este resultado for, maior é a tendência de o material sofrer um processo de oxidação. Para o tratamento térmico de 1 hora o resultado do OCP se apresentou menos negativo, enquanto que para o tratamento de 24 horas, o resultado se apresentou mais negativo, confirmando que para maiores tempos de envelhecimento, menor a resistência à corrosão.

Confirmando os resultados de OCP, as amostras envelhecidas por maiores períodos de tempo apresentaram menores valores de potencial e maior densidade de corrente, indicando menor resistência ao meio corrosivo em relação as que passaram por menores tempos de tratamento.

Por fim, os valores da impedância, reafirmando os resultados obtidos pelas curvas de polarização, mostraram que para as amostras com menores tempos de envelhecimento, apresentaram maior resistência à corrosão do material.

## **7 TRABALHOS FUTUROS**

Quantificar a fração volumétrica de austenita revertida no aço maraging da classe 350 em função do tempo de envelhecimento a partir da técnica de difração de raios-X.

Verificar a estabilização da quantidade de austenita revertida após tempo de tratamento térmico de envelhecimento do Aço Maraging 350.

Finalizar os ensaios de dureza após realização dos tratamentos térmicos de envelhecimento para o aço maraging 350 nos tempos de tratamento abordados neste trabalho, visto não foi possível completar esta atividade em decorrência da pandemia.

Realizar estudo microestrutural das amostras envelhecidas para cada parâmetro de tempo de tratamento térmico utilizado neste trabalho para quantificar o surgimento de precipitados.

## 8 REFERÊNCIAS

- [1] LOPES, Julio C. O. OS AÇOS MARAGING. 2007. 19 v. - Curso de Ciência e Tecnologia dos Materiais, São Paulo, São Paulo, 2007.
- [2] MAGNÉE A., DRAPIER J.M., DUMONT J., COUTSOURADIS D., HABRAKEN L., COBALT CONTAINING HIGH-STRENGTH STEELS. Bruxelles – Belgique: Centre D'information du Cobalt, 1974.
- [3] Viswanathan, U.K.; Dey, G. K.; Sethumadhavan, V. Effects of austenite reversion during overageing on the mechanical properties of 18 Ni (350) maragingsteel, Mater. Sci. Eng. A. 398 (2005) 376–372.
- [4] SHA, W.; GUO, Z. Maraging steels: modelling of microstructure, properties and applications. Oxford [etc.]: Woodhead Publishing Limited, 2009.
- [5] Aço maraging. Mecânica Industrial, 2013. Disponível em: < <https://www.mecanicaindustrial.com.br/514-aco-maraging> >. Acesso em: 05 jul. 2020.
- [6] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio Certificação Digital N°0321310/CA. 3 Materiais e métodos - Maxwell - PUC-Rio, [s.d.]. Materiais e métodos. Disponível em: < [https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/9220/9220\\_4.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/9220/9220_4.PDF) >. Acesso em: 06 jul. 2020.
- [7] SCHMIDT, M.; ROHRBACH, K. Heat treatment in maraging steels. In: Metals Handbook. 10a ed. ASM. Metals Park. v. 4,1991, p. 219-228.
- [8] PADIAL, A. G. F. Transformações de fase e propriedades mecânicas de um aço maraging sem cobalto. Dissertação (mestrado) – IPEN, São Paulo, 1994.88 p.
- [9] KALISH, D., RACK, H. J. Thermal Embrittlement of 18Ni (350) Maraging Steels. Metallurgical Transactions, v. 2, p. 2665-2672, September 1971.

- [10] ROCHA, C. J. Efeito do Tratamento Termomecânico na Microsegregação de um aço Maraging Grau 1900 Mpa. Universidade Estadual de Campinas-Faculdade de Engenharia Mecânica e Departamento de Engenharia de Materiais, Campinas 1995.
- [11] POORNIMA, T.; JAGANNATHA, Nayak; SHETTY, A. Nityananda. Studies on Corrosion of Annealed and Aged 18 Ni 250 Grade Maraging Steel in Sulphuric Acid Medium. 2010. Curso de Metallurgy And Materials Engineering, Department Of Science And Humanities, Pesit Bangalore-560085, India, Karnataka, 2010.
- [12] KERMANI, M.B; MORSHED, A. Carbon dioxide corrosion in oil and gas production—A compendium. *Corrosion*, v. 59, p. 659-683, 2003.
- [13] CASCUDO, O. O Controle da Corrosão de Armadura de Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas. São Paulo: Editora Pini Ltda. 237. 1997.
- [14] WOLYNEC, S. Técnicas Eletroquímicas em Corrosão. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 166p.
- [15] AVELINO JUNIOR, Archimedes Fortes. ESTUDO DA CORROSÃO DO AÇO MARAGING GRAU 300 EM MEIO DE CLORETO CONTENDO CO<sub>2</sub> E CO<sub>2</sub> / H<sub>2</sub>S. 2017. 135 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- [16] IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS. São Paulo: Scielo, v. 8, n. 4, jun. 2015.
- [17] NASCIMENTO, Cleberson Lopes do. DIAGNÓSTICO DE CORROSIVIDADE EM ELETRODO DE ATERRAMENTO ELÉTRICO COBREDO. 2013. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- [18] L. d P. NUNES. Fundamentos de resistência à corrosão. Rio de Janeiro: ABRACO, 2007

[19] NUNES, G.C.s. et al. Maraging-350steel:Following the aging through diffractometric, magnetic and hyperfine analysis. 2016. 5 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Departamento de Física, Universidade Estadual de Maringá, Paraná,, 2016.

[20] NIINOMI, M. (Ed.). Metals for Biomedical Devices. Boca Raton: Elsevier, 2010.

[21] CARDOSO, Jorge Luiz. Avaliação e comparação da resistência à corrosão por pites do aço superaustenítico AL 6XN PLUS™ e dos aços inoxidáveis austeníticos da série AISI304L, 316L e 317L. 2011.

[22] SUNDMAN, B. Thermo-Calc, a general tool for phase diagram calculations. In: Computer Aided Innovation of New Materials. North Holland: Elsevier Science Publishers B. V., 1991. p. 795–798.

[23] KUMAR, P; SHETTY, A.N. Electrochemical Investigation on the Corrosion of 18%Ni M250 Grade Maraging Steel under Welded Condition in Sulfuric Acid Medium. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, v. 49, n. 3, p. 253–260, 2013