AVALIAÇÃO DO EFEITO DO MEIO OXIDANTE SOBRE A RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS INOX AISI 304 E AISI 316

Renato Santiago de Paiva Araujo

Rio de Janeiro

2015

RENATO SANTIAGO DE PAIVA ARAUJO

Aluno do curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos

Matrícula 1021357555

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO MEIO OXIDANTE SOBRE A RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS INOX AISI 304 E AISI 316

Trabalho de Conclusão de Curso, TCC, apresentado ao Curso de Graduação em Tecnologia em Processos Metalúrgicos, da UEZO como requisitos para obtenção do grau de Tecnólogo em Processos Metalúrgicos, sob a orientação da Prof.ª Dr.ª Ana Isabel de Carvalho Santana.

Rio de Janeiro

Abril de 2015

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO MEIO OXIDANTE SOBRE A RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS INOX AISI 304 E AISI 316

Elaborado por Renato Santiago de Paiva Araujo

Aluno do curso de Tecnologia em Processos Metalúrgicos

Este trabalho foi analisado e aprovado com

Grau: .....

Rio de Janeiro,_____, de _____, de 2015

_____

Prof. DSc. Ana Isabel de Carvalho Santana

_____

Prof. DSc. Roberta Gaidzinsk

_____

Prof. DSc. Wilma Clemente de Lima Pinto

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2015

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram nessa jornada.

Agradeço ao Prof. Dr. Carlos Roberto Falcão de Albuquerque Jr. por ceder o LPPM para realização do projeto.

Aos meus amigos e professores por todo o auxílio.

A minha orientadora Prof.ª Dr.ª Ana Isabel de Carvalho Santana por toda orientação e dedicação.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. *Marthin Luther King* (1929 – 1968)

RESUMO

Os aços inoxidáveis austeníticos estão entre as ligas ferrosas mais utilizadas no meio industrial devido à combinação de suas propriedades mecânicas associadas à resistência a corrosão. No entanto, devido à utilização desses materiais em meios com agressividade elevada, muitas pesquisas vêm sendo realizadas no sentido de diminuir o custo gerado pelas perdas de material devido a processos de corrosão. Este trabalho, tem como objetivo avaliar a relação entre o meio oxidante e resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e AISI 316. Amostras destes materiais foram submetidas a ensaios eletroquímicos de curva de polarização potenciodinâmica em diferentes eletrólitos. A superfície das amostras após os ensaios eletroquímicos foi obtida através da microscopia ótica com o objetivo de verificar o tipo e a intensidade dos processos corrosivos nos meios estudados. Os resultados mostraram que em ambiente marinho os aços inox se mostraram mais resistentes à corrosão que o aço tipo aço carbono. No entanto, o aço 316 mostrou-se o mais resistente dentre os aços inoxidáveis. O aumento da concentração de íons cloreto, assim como o aumento da temperatura do meio oxidante provocaram um aumento nos processos de corrosão por pite em ambos os aços inox. A acidificação do meio também provocou resultado semelhante, causando também o surgimento de uma região de transição ativo-passiva em ambos os materiais. O tratamento térmico nas temperaturas de 600 e 700°C provocou uma diminuição da resistência à corrosão por pite em ambos os materiais. De um modo geral, o aço inoxidável AISI 316 mostrou uma maior resistência à corrosão que o aço 304 nas condições testadas neste trabalho.

Palavras-chave: Aço inoxidável austenitico; Corrosão por pite; meio oxidante

ABSTRACT

The austenitic stainless steels are between the most ferrous alloys used in industry due to the combination of mechanical properties associated with corrosion resistance. However, due to the use of these materials in media with high aggressiveness, many studies have been performed in order to reduce the cost generated by the loss of material due to corrosion processes. This work aims to evaluate the relation between the oxidizing environment and corrosion resistance of austenitic stainless steel AISI 304 and AISI 316. Samples of these materials were subjected to electrochemical tests of potentiodynamic polarization curve in different electrolytes. The surface of the samples after the electrochemical tests was obtained by optical microscopy in order to verify the type and intensity of the corrosive processes in the studied media. The results showed that in the marine environment, stainless steels were more resistant to corrosion than the steel of type carbon steel. However, the 316 showed to be the most resistant between the stainless steels. Increasing the concentration of chloride ions, as well as the increase in temperature of the oxidizing media caused an increase in the pitting corrosion processes in both stainless steels. The acidification of the environment also showed similar results, also causing the appearing of active-passive transition region in both materials. The heat treatment at temperatures of 600 to 700 ° C caused a decrease in resistance to pitting corrosion in both materials. In general, the AISI 316 stainless steel showed a higher corrosion resistance than the 304 conditions tested in this study.

Keywords: Austenitic stainless steel; pitting corrosion; oxidizing media

SUMÁRIO

Página

RESUMO vi
ABSTRACT vii
LISTA DE TABELAS ix
LISTA DE FIGURAS x
1. INTRODUÇÃO 1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3
2.1 LIGAS FERROSAS 3
2.1.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS 7
2.2 EFEITO DE PRECIPITADOS NOS AÇOS INOX AUSTENÍTICOS 9
2.3 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS 11
2.4 FENÔMENOS CORROSIVOS EM AÇOS INOXIDAVEIS AUSTENÍTICOS 12
2.4.1 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS APLICADOS AO ESTUDO DA CORROSÃO 15
2.4.2 CURVA DE POLARIZAÇÃO 17
3. MATERIAIS E MÉTODOS 20
3.1 CORPO DE PROVA 20
3.2 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS 20
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 24
4.1 MICROESTRUTURA DOS AÇOS INOX AUSTENÍTICOS AISI 304 E 316 24
4.2 COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS INOX AISI 304, AISI 316 E AÇO CARBONO 25
4.3 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE ÍONS CLORETO 29
4.4 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO 32
4.5 EFEITO DO PH DA SOLUÇÃO SOBRE A CORROSÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS 36
5. CONCLUSÕES 43
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 44
7. TRABALHOS FUTUROS 47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Elementos de liga dos aços AISI 304 e AISI 316.....8
Tabela 2: Ataques utilizados para revelar a microestrutura dos aços inoxidáveis.....21
Tabela 3: Análise Química dos aços AISI 304, AISI 316 e aço carbono.....24
Tabela 4: Potenciais de corrosão e de pite dos aços inox AISI 304 e AISI 316 e aço carbono em NaCl 3,5%.....26
Tabela 5: Potenciais de corrosão e de pite dos aços inox AISI 304 e AISI 316 em NaCl 3,5% e 25%.....30
Tabela 6: Potenciais de corrosão dos aços inox AISI 304 e AISI 316 envelhecidos em NaCl 3,5%.....33
Tabela 7: Potenciais de corrosão e de pite dos aços inox AISI 304 e AISI 316 CR em NaCl 3,5% pH 5,7 e pH2.....37
Tabela 8: Potenciais de corrosão e de pite dos aços inox AISI 304 e AISI 316 CR em NaCl aquecido.....40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Microscopia ótica do aço inox martensítico sobre ataque químico Vilella.....4
Figura 2: Microestrutura do aço inoxidável ferrítico sobre ataque químico Vilella.....5
Figura 3: Microestrutura do aço duplex SAF 2205.....6
Figura 4: MEV do aço inox 304 atacado em HF-HNO_3.....6
Figura 5: Formação de precipitado de $Cr_{23}C_6$ em um aço inoxidável austenítico.....10
Figura 6: Precipitação do carbeto de cromo nos contornos de grão.....10
Figura 7: Corrosão uniforme ou generalizada em chapa metálica.....12
Figura 8: corrosão por pite em aço inoxidável duplex SAF 2205.....13
Figura 9: Corrosão intergranular.....13
Figura 10: Curva de voltametria cíclica (ciclos de 1 a 20) em aço inox AISI 316L.....16
Figura 11: Ensaio eletroquímico de impedância realizado após voltametria cíclica do aço AISI 304.....16
Figura 12: Curvas de polarização clássicas.....17
Figura 13: Gráfico de polarização anódica e catódica.....18
Figura 14: Comparação dos aços inoxidáveis austeníticos 304L e 316L em solução de 1g\L NaCl + 1g\L NaClO, pH 5,7.....29
Figura 15: Esquema de célula eletrolítica.....22
Figura 16: Esquema de eletrodos.....23
Figura 17: Microscopia ótica dos aços inox 304, 316 após ataques químicos.....25
Figura 18: Curva de polarização dos aços inox 304, 316 e aço carbono em NaCl 3,5% a 1mV/s.....26
Figura 19: Microscopia ótica dos aços inox AISI 304, AISI 316 e aço carbono em NaCl 3,5%.....28
Figura 20: Curva de polarização do aço inox AISI 304 e AISI 316 em NaCl 3,5 e 25% a 1mV/s.....29
Figura 21: Microscopia ótica dos aços inox AISI 304, AISI 316 em NaCl 3,5% e 25%.....31
Figura 22: Curvas de polarização do aço inox AISI 316 nas condições CR, e envelhecido 600 e 700°C em NaCl 3,5% a 1mV/s.....32

Figura 23: Curva de polarização do aço inox AISI 304 nas condições CR, e envelhecido 600 e 700°C em NaCl 3,5% a 1mV/s.....33
Figura 24: Microscopia ótica dos aços inox AISI 304 e AISI 316 CR e envelhecidos 600 e 700°C por uma hora em forno em NaCl 3,5%.....35
Figura 25: Curvas de polarização dos aços inox AISI 304 e AISI 316 em NaCl 3,5% pH 5,7 e pH2 a 1mV/s.....36
Figura 26: Microscopia ótica dos aços inox AISI 304 e AISI 316 em NaCl 3,5% pH 5,7 e pH2.....38
Figura 27: Curva de polarização do aço inox AISI 304 em NaCl 3,5% em temperatura ambiente e aquecido 40 e 70°C a 1mV/s.....49
Figura 28: Curva de polarização do aço inox AISI 316 em NaCl 3,5% em temperatura ambiente e aquecido 40 e 70°C a 1mV/s.....40
Figura 29: Microscopia ótica dos aços inox AISI 304 e AISI 316 nas condições CR em NaCl 3,5% em temperatura ambitente e aquecido à 40 e 70°C.....42

1. INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos são ligas ferrosas que possuem sua matriz arranjada em estrutura cúbica de face centrada, conhecida como fase austenítica (Fe γ). Esta fase é o principal microconstituinte destes aços. Os aços inoxidáveis austeníticos possuem em sua composição juntamente com o ferro altos teores de cromo e níquel, sendo este um dos principais motivos de serem amplamente utilizadas no meio industrial. Estes materiais apresentam uma ampla gama de aplicações devido à alta resistência mecânica associada à resistência a corrosão. Essa combinação de propriedades permite aos aços austeníticos serem utilizados na indústria química, petroquímica, naval, off shore, de petróleo e gás, alimentícia etc.

A resistência à corrosão desses materiais é comprovadamente superior quando comparadas a outros materiais tais como o aço carbono, os microligados etc. Pode-se associar a maior resistência à corrosão desse material com o elevado teor de cromo, na composição do material. Em determinados meios ocorre a formação de uma película protetora sobre a superfície desses aços devido à presença do cromo (óxido de cromo - Cr_2O_3), e é justamente esta película a principal responsável pela elevada resistência à corrosão desses materiais.

Porém, existem alguns meios e condições onde essa película pode falhar, acarretando consequentemente em um aumento da susceptibilidade à corrosão destes aços, sobretudo quando esta película falha em pontos específicos dando origem ao fenômeno da corrosão por pite. Dentre os fatores que podem acelerar os processos devem ser considerados: o pH do meio, a temperatura, a concentração dos íons no meio, entre outros. Além da corrosão por pite, também podem ser observados outros tipos de fenômenos corrosivos tais como a corrosão intergranular, a corrosão por crevice, a corrosão sob tensão entre outros.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas a respeito dos diferentes tipos de fenômeno corrosivos que atingem os aços inoxidáveis austeníticos. Dentre as principais ferramentas utilizadas nestas pesquisas mais recentes pode-se destacar algumas técnicas gravimétricas e os ensaios eletroquímicos, tais como: curvas de polarização, impedância e ruído eletroquímico, DL-EPR, ensaios de perda de massa etc. Em geral esses ensaios vêm complementados por análises de superfície, de micro e macro estrutura e análise química do material.

Considerando a ampla aplicabilidade e a importância industrial destes materiais, assim como o considerável gasto de recursos para minimizar os processos corrosivos, este trabalho tem como principal objetivo investigar a relação entre as diferentes variáveis do meio oxidante (pH, concentração de cloreto, temperatura) com a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos 304 e 316.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGAS FERROSAS

Nos dias atuais, os diferentes tipos de materiais apresentam uma grande importância em nosso cotidiano. Suas aplicações são diversas e variam de acordo com o campo que será utilizado, suas propriedades, etc. Os materiais metálicos são amplamente utilizados por possuírem características como: boa condução de calor e eletricidade, propriedades magnéticas, resistência mecânica, etc. Dentre os materiais metálicos, pode-se destacar as ligas ferrosas, como uma das mais utilizadas no meio industrial, no cotidiano etc. Entende-se por ligas ferrosas, todas as ligas metálicas onde o principal constituinte é o ferro. A aplicação dessas ligas dependerá da composição da mesma, e de suas características mecânicas e estruturais. De um modo geral considera-se que as propriedades das ligas ferrosas assim como a sua aplicação depende de fatores como: Composição química, microestrutura e condições de processamento. (CHIAVERINI, 2008; CALLISTER, 2002).

De acordo com Chiaverini, 2008, o aço é definido como uma liga que contém como principais componentes o ferro e o carbono, sendo por este motivo classificado como liga ferro-carbono. Em teoria, essa liga se classificaria como binária (ferro-carbono), mas em prática ela sempre apresentará alguns outros elementos residuais contidos nela devido ao tipo de processo de fabricação que receberá, como fósforo, silício, enxofre, entre outros, esses aços são chamados de aços comerciais.

Os aços têm um limite de solubilidade de carbono em sua composição. O valor do limite inferior é de 0,008% de C e o limite superior é de 2,11% de carbono, a quantidade máxima é dependente da presença de outros elementos que podem ser elementos residuais, ou elementos de liga. (CHIAVERINI, 2008; CALLISTER, 2002).

Os aços são comumente divididos em aço carbono e aço liga. O aço carbono como dito anteriormente apresentam uma faixa entre 0,008 a 2,11% de carbono em sua estrutura e elementos residuais que provém dos processos de fabricação. Por sua vez o aço-liga é o aço que contém elementos residuais acima do comum (CHIAVERINI, 2008).

Segundo informado por Chiaverini, 2008, os aços carbono podem ser divididos em:

- Aços de baixo teor de carbono, com teores de carbono menores que 0,2%;
- Aços de médio teor de carbono, com teores de carbono entre 0,2 e 0,5%;
- Aços de alto teor de carbono, com teores de carbono maiores que 0,5%.

Os aço-liga dividem-se em:

- Aços de baixo teor de elementos de liga, com elementos de liga menores que 8%;
- Aços de alto teor de elementos de liga, com elementos de liga, com elementos de liga maiores que 8%.

Dentre os inúmeros tipos de aço existentes existe um grupo específico de aços conhecidos como aços inoxidáveis, estes aços possuem determinados elementos de liga em sua estrutura que garantem em determinadas condições uma maior resistência à oxidação em determinados meios. Estes materiais comumente divididos em quatro grupos principais, a saber: aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos, martensíticos e duplex (SANCHES, 2009; CHIAVERINI, 2008, CALLISTER, 2002).

Os aços inoxidáveis martensíticos são aços que têm como principal microconstituinte, a martensita. Esse tipo de aço contém percentuais de cromo (Cr) entre 11,5 e 18% em sua composição. São endurecidos por tratamento térmico de têmpera (resfriamento rápido). Os aços matensíticos apresentam propriedades ferro-magnéticas, e boa resistência à corrosão em algumas condições: baixo teor de carbono, presença de cromo e níquel na composição. (CHIAVERINI, 2008, CALLISTER, 2002). A Figura 1 apresenta um exemplo de material com microestrutura martensítica disposta em ripas paralelas (STROBEL FILHO, 2007).

Figura 1: Microscopia ótica do aço inox martensítico (revenido, resfriado ao ar, com alívio de tensão) sobre ataque químico Vilella (STROBEL FILHO, 2007)

Os aços inoxidáveis ferríticos, são aços que contém a ferrita α como microconstituinte, e apresentam estrutura CCC (cúbica de corpo centrado). Podem ter percentuais de cromo em sua composição de até 25% e não são endurecíveis por têmpera. Esses aços são facilmente trabalhados a frio e se caracterizam por apresentarem boa resistência à corrosão tanto em temperatura ambiente como em temperatura mais elevada (CHIAVERINI, 2008, CALLISTER, 2002). Uma microesturura típica de aços inoxidáveis ferríicos está apresentada na Figura 2 (LUZ, 2013).

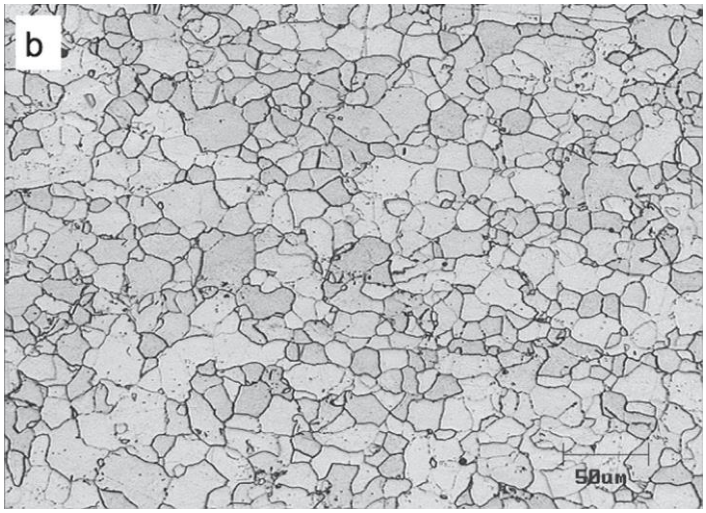


Figura 2: Microestrutura do aço inoxidável ferrítico sobre ataque químico Vilella (LUZ, 2013)

Os aços inoxidáveis austeníticos, são aços que possuem microestrutura austeníticos. São aços que possuem boa resistência à corrosão devido principalmente a dois de seus elementos de liga, que são o cromo e o níquel. Esses materiais não apresentam características magnéticas, e não são endurecíveis. Devido à resistência à corrosão, aliadas a outras propriedades são utilizados em diversos meios industriais, que se caracterizam por apresentar meios agressivos, tais como; indústria química, petróleo, naval etc. (IBRAHIM, 2008; CHIAVERINI, 2008). A figura 3 mostra a microestrutura do aço inox austeníticos 304 (HERMAS, 1994).

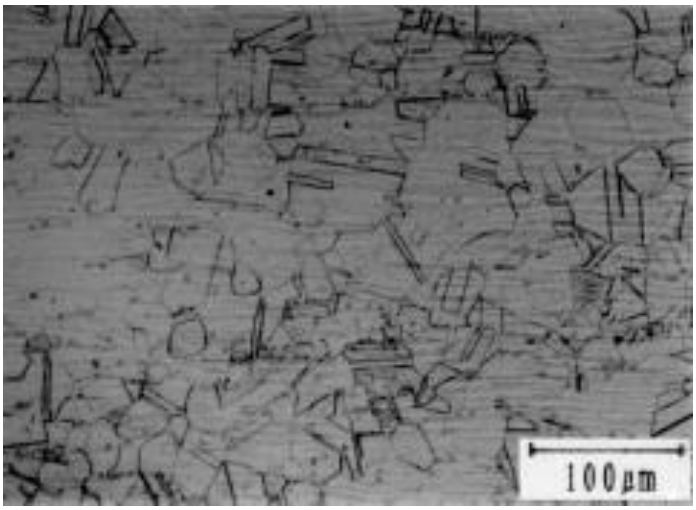


Figura 3: Aço inox 304 revelado em HF-HNO_3 (HERMAS, 1994)

Os aços inoxidáveis duplex e superduplex foram desenvolvidos para situações onde são necessárias maior resistência à corrosão do que as apresentadas por outros tipos de aços inox. Sua microestrutura possui a presença de duas fases ao mesmo tempo: austenita e a ferrita, constituindo-se de um sistema bifásico, e possui como principais elementos de liga o cromo, o molibdênio, o nitrogênio e o níquel. Os teores de cromo nestes aços variam de 22 a 28%, de níquel de 2 a 8% , molibdênio entre 0,2 e 5 % e a adição de nitrogênio pode chegar até 0,35% (CHIAVERINI, 2008; TAVARES, 2006; MARTINS, 2006). Na Figura 4 é possível verficar um exemplo da microestrutura bifásica de um aço austeníticos duplex (SENATORE, 2012).

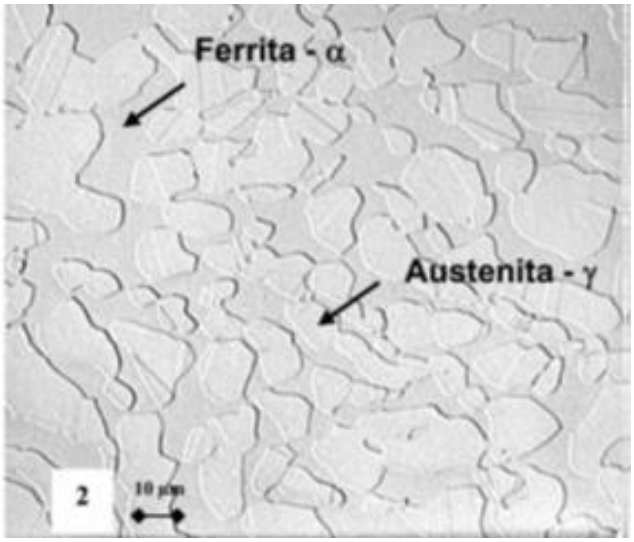


Figura 4: microestrutura do aço duplex SAF 2205 (SENATORE, 2012)

Cada teor de elementos de liga contidos na composição dos aços superduplex fornece algum tipo de melhoria em suas estruturas, por exemplo, o cromo e níquel aumentam a resistência a corrosão, o molibdênio aumenta a resistência a corrosão localizada, generalizada e em frestas, o nitrogênio aumenta a resistência a corrosão localizada e melhora a resistência mecânica. Além dos elementos de liga nos aços inox superduplex, seu sistema bifásico também contribui para melhores propriedades. A austenita aumenta a tenacidade ao impacto desses aços e a ferrita contribui para melhores propriedades mecânicas e melhor soldabilidade (CHIAVERINI, 2008; MARTINS, 2006).

2.1.1 AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

Os aços inoxidáveis austeníticos são como citado anteriormente caracterizados por possuírem como principal microconstituinte a fase austenítica (fase γ). Os aços inox austeníticos são obtidos pela adição de elementos de liga específicos, que aumentam o campo austenítico até a temperatura ambiente, visto que a austenita é obtida a partir de 727°C. Esses aços possuem, além do cromo, o níquel como principais elementos de liga, o que aumenta ainda mais a resistência à corrosão do aço, pois ambos niquel e cromo possuem a capacidade de formar películas de óxidos na superfície do material. Nos aços inox do tipo austeníticos a proporção desses elementos de liga varia em sua maior parte entre os teores de 18% de Cr e 8% de Ni. (CHIAVERINI, 2008, CALLISTER, 2002). Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam além da considerável resistência à corrosão, boas propriedades mecânicas, soldabilidade etc (RAMANA, 2009). Esse conjunto de características é responsável pela ampla aplicação desses materiais no meio industrial.

Com uma exemplificação bastante criteriosa realizada por Chiaverini, 2008, podemos dizer que os diferentes comportamentos dos aços inox austeníticos com relação a resistência a corrosão, se destaca principalmente pela variação dos teores dos elementos de liga na estrutura desses aços, lembrando que existem outros fatores que podem modificar este comportamento (CHIAVERINI, 2008). A tabela 1, obtida de Chiaverini (2008) apresenta os percentuais de teores de elementos de liga em diferentes tipos aços inox austeníticos.

Tabela 1: Elementos de liga dos aços inoxidáveis austeníticos (CHIAVERINI, 2008).

Tipo AISI	C	Mn max.	P max.	S max.	Si max.	Cr	Ni	Mo	Outros elementos
201	0,15 max	5,5/ 7,5	0,060	0,030	1,00	16,00/18,00	3,50/5,50	----	N=0,25max
202	0,15 max	7,50/ 10,0	0,060	0,030	1,00	17,00/19,00	4,00/6,00	----	N=0,25max
205	0,12/ 0,25	14,00/ 15,00	0,030	0,030	0,50	16,50/18,00	1,00/1,75	----	----
301	0,15 max	2,00	0,045	0,030	1,00	16,00/18,00	8,00/10,00	----	----
302	0,15 max	2,00	0,045	0,030	1,00	17,00/19,00	8,00/10,00	----	----
302B	0,15 max	2,00	0,045	0,030	2,00/ 3,00	17,00/19,00	8,00/10,00	----	----
303	0,15 max	2,00	0,20	0,15min	1,00	17,00/19,00	8,00/10,00	0,60max	----
303 Se	0,15 max	2,00	0,20	0,060	1,00	17,00/19,00	8,00/10,00	----	Se=0,15min
304	0,08 max.	2,00	0,045	0,030	1,00	18,00/20,00	8,00/10,50	----	----
304L	0,03 max	2,00	0,045	0,030	1,00	18,00/20,00	8,00/12,00	----	----
304H	0,04/ 0,10	2,00	0,040	0,030	0,75	18,00/20,00	8,00/12,00	----	----
304N	0,08 max	2,00	0,045	0,030	1,00	18,00/20,00	8,00/10,50	----	N=0,10/0,16
305	0,12 max	2,00	0,045	0,030	1,00	17,00/19,00	10,50/13,00	----	----
308	0,08 max	2,00	0,045	0,030	1,00	19,00/21,00	10,00/12,00	----	----
309	0,20 max	2,00	0,045	0,030	1,00	22,00/24,00	12,00/15,00	----	----
309S	0,08 max	2,00	0,045	0,030	1,00	22,00/24,00	12,00/15,00	----	----
310	0,25 max	2,00	0,045	0,030	1,50	24,00/26,00	19,00/22,00	----	----
310S	0,08 max	2,00	0,045	0,030	1,50	24,00/26,00	19,00/22,00	----	----
314	0,25 max	2,00	0,045	0,030	1,60/ 3,00	23,00/26,00	19,00/22,00	----	----
316	0,06 max	2,00	0,045	0,030	1,00	16,00/18,50	10,50/13,50	2,00/2,50	----
316	0,06 max.	2,00	0,045	0,030	1,00	16,00/18,50	11,00/14,00	2,50/3,00	----
316H	0,04/ 0,10	2,00	0,030	0,030	0,75	16,00/18,50	11,0013,50	2,00/2,50	----
316H	0,04/ 0,10	2,00	0,030	0,030	0,75	16,00/18,50	11,00/14,00	2,50/3,00	----
316F	0,08 max	2,00	0,10 min	0,10min	1,00	16,00/18,50	10,00/14,00	1,75/2,50	----
316L	0,03 max	2,00	0,045	0,030	1,00	16,00/18,50	11,00/14,00	2,00/2,50	----
316L	0,03 max	2,00	0,045	0,030	1,00	16,00/18,50	11,50/14,50	2,50/3,00	----
316N	0,08 max	2,00	0,045	0,030	1,00	16,00/18,50	10,00/14,00	2,00/3,00	N=0,10/0,16
317	0,08 max	2,00	0,045	0,030	1,00	18,00/20,00	11,00/15,00	3,00/4,00	----
317L	0,03 max	2,00	0,045	0,030	1,00	18,00/20,00	11,00/15,00	3,00/4,00	----
321	0,08 max	2,00	0,045	0,030	1,00	17,00/19,00	9,00/12,00	----	Ti=5xCmin; 0,8max
321 H	0,04/ 0,10	2,00	0,030	0,030	0,75/ 1,50	17,00/19,00	9,00/13,00	----	Ti=4xCmin; 0,6max
329	0,10 max	2,00	0,040	0,030	1,00	25,00/30,00	3,00/6,00	1,00/2,00	----
330	0,08 max	2,00	0,040	0,030	0,75/ 1,50	17,00/20,00	34,00/37,00	----	----
347	0,08 max	2,00	0,045	0,030	1,00	17,00/19,00	9,00/12,00	----	Nb+Ta=10xCmin; 1,00max
347 H	0,04/ 0,10	2,00	0,030	0,030	1,00	17,00/19,00	9,00/13,00	----	Nb+Ta=10xCmin; 1,00max

348	0,08 max	2,00	0,045	0,030	1,00	17,00/19,00	9,00/13,00	----	Nb+Ta=10xCmin; 1,00max; Ta=0,10max; Co=0,2max
348 H	0,04/ 0,10	2,00	0,045	0,030	1,00	17,00/19,00	9,00/13,00	----	Nb+Ta=10xCmin; 1,00max; Ta=0,10max; Co=0,1max
384	0,08 max	2,00	0,045	0,030	1,00	15,00/17,00	17,00/19,00	----	----

Como pode ser visto, a maioria dos elementos de liga tem os mesmos teores na estrutura destes aços. A diferença entre eles está no carbono (C), a presença de molibdênio em alguns aços, e principalmente a variação dos teores de Cromo (Cr) e Níquel (Ni), que como já foi dito anteriormente, são aqueles que proporcionam aos aços inox austeníticos, uma boa resistência a corrosão (CHIAVERINI, 2008).

2.2 EFEITO DE PRECIPITADOS NOS AÇOS INOX AUSTENÍTICOS

As propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos pode muitas vezes ser dependente de um fenômeno denominado sensitização. Esse fenômeno ocorre devido à precipitação de carbonetos de cromo no contorno de grão do aço, acarretando em diferentes tipos de problemas sendo um dos mais citados a corrosão intergranular. Esta precipitação de carbonetos ocorre pelo fato do aço ser exposto a altas temperaturas, como por exemplo, tratamentos térmicos e operações de soldagem. A formação dos precipitados não depende somente da temperatura de precipitação, mas também do tempo de resfriamento, quanto mais lento for o resfriamento do aço maior será a formação dos precipitados na microestrutura do aço (CHIAVERINI, 2008; RASHID, 2012; POHL, 2006).

De acordo com Silva e Mei (2013) o carboneto de cromo do tipo $Cr_{23}C_6$ é o principal tipo de precipitado encontrado no contorno de grão. Esse tipo de precipitação empobrece consideravelmente a fase austenita (matriz) em termos de teores de cromo, dessa forma a fase fica mais susceptível à corrosão. A figura 5 demonstra o carbeto de cromo ($Cr_{23}C_6$) presente nos contornos de grão do aço inox austenítico. (ROCHA JUNIOR, 2011).

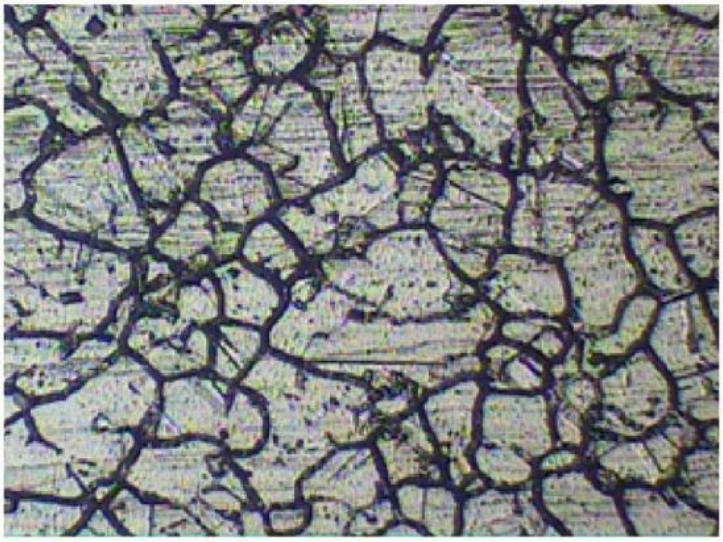


Figura 5: Formação de precipitado de $Cr_{23}C_6$ em um aço inoxidável austenítico (ROCHA JUNIOR, 2011)

Segundo Silva e Mei (2013) a sensitização pode ocorrer numa faixa de temperatura entre 425 e 815ºC e pode ocorrer em situações diversas tais como no resfriamento após um processo de forjamento, no alívio de tensões, em procedimentos de soldagem etc. Muitos estudos são encontrados na literatura a respeito da precipitação de carbonetos em aços austeníticos em virtude de processos que envolvem temperatura. (ROCHA JUNIOR, 2011; RITONI, 2007, SANCHES 2009). A Figura 6 apresenta um esquema da precipitação desses carbonetos no contorno de grão de um material metálico (SANCHES, 2009 *apud* PADILHA 1994).

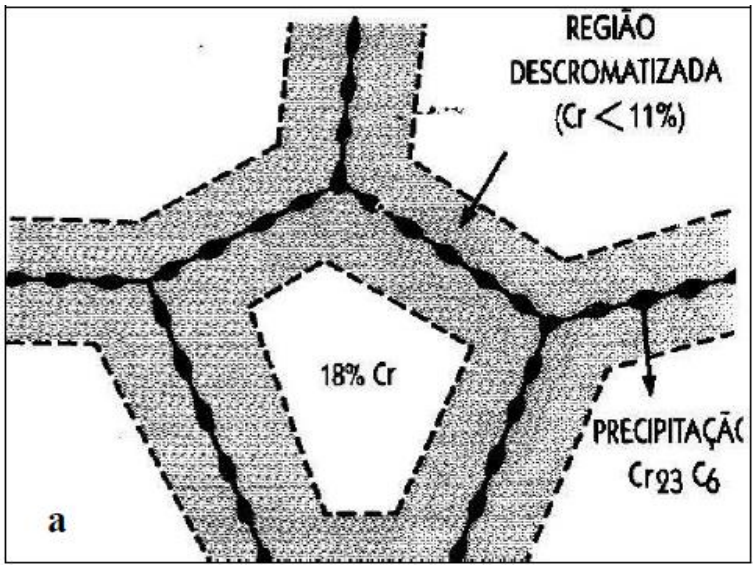


Figura 6: Precipitação do carbeto de cromo nos contornos de grão (SANCHES, 2009 *apud* PADILHA 1994)

2.3 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO NOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

A aplicação dos aços depende de um conjunto de propriedades específicas que podem ser obtidas de diferentes modos. O tratamento térmico é o tipo de processo envolvendo diferentes tipos de operações aquecimento-resfriamento sob condições específicas e bem controladas que tem como função conferir determinadas propriedades aos materiais metálicos. (CHIAVERINI, 2008). Existem inúmeras situações em que o aço precisará ser tratado termicamente. Contudo, é preciso conhecer bem o processo de tratamento térmico a ser utilizado e também as propriedades do aço que será submetido a tal tratamento (CHIAVERINI, 2008).

Devido à transformação da estrutura dos aços, os mesmos podem receber melhorias em suas propriedades. Algumas mudanças ocorridas se encontram abaixo:

- Aumento da resistência à corrosão;
- Alívio de tensões, devido ao esfriamento;
- Melhoria da resistência mecânica;
- Variação da dureza (aumento ou diminuição, dependendo da área de atuação);
- Aumento da resistência ao calor;
- Melhoria na ductilidade.

Atualmente, muitos trabalhos vêm sendo realizados sobre a influência que os tratamentos térmicos exercem sobre os aços inoxidáveis. Hong e colaboradores (2012) investigou o efeito do tratamento térmico de envelhecimento a 900ºC, variando o tempo do tratamento sobre a corrosão intergranular do aço duplex UNS S32750.

Ritoni (2007) e colaboradores observaram o efeito de diferentes tipos de tratamento térmico sobre as propriedades de um aço inoxidável superaustenítico (22Cr-25Ni-7Mo-0,3N). Os autores observaram que para maximizar as propriedades mecânicas de resistência ao impacto o tratamento térmico de solubilização deveria ser realizado dentro da faixa de temperatura de 1150º – 1200ºC. Por sua vez o alívio de tensão não deveria ultrapassar a temperatura de 500ºC.

2.4 FENÔMENOS CORROSIVOS EM AÇOS INOXIDAVEIS AUSTENÍTICOS

A corrosão é o fenômeno mundialmente conhecido por causar a deterioração dos materiais por uma ação que pode ser química ou eletroquímica. A velocidade e a extensão de um processo corrosivo dependem do tipo do material metálico e do meio corrosivo (GENTIL, 2007; CHIAVERINI, 2008).

Gentil, (2007) afirma que a corrosão pode ocorrer de diferentes formas, e que é de fundamental importância saber diferenciar entre os diversos tipos de corrosão a fim de conseguir minimizar os danos causados por este fenômeno. Dentre os diferentes tipos de corrosão pode-se citar: corrosão intergranular, corrosão puntiforme ou por pite, corrosão uniforme (generalizada), por frestas, transgranular etc (GENTIL, 2007; NUNES 2007).

Corrosão generalizada: É um tipo de corrosão que está presente em toda a superfície exposta. Ocorre neste caso uma perda uniforme de espessura da amostra (GENTIL, 2007; NUNES 2007).

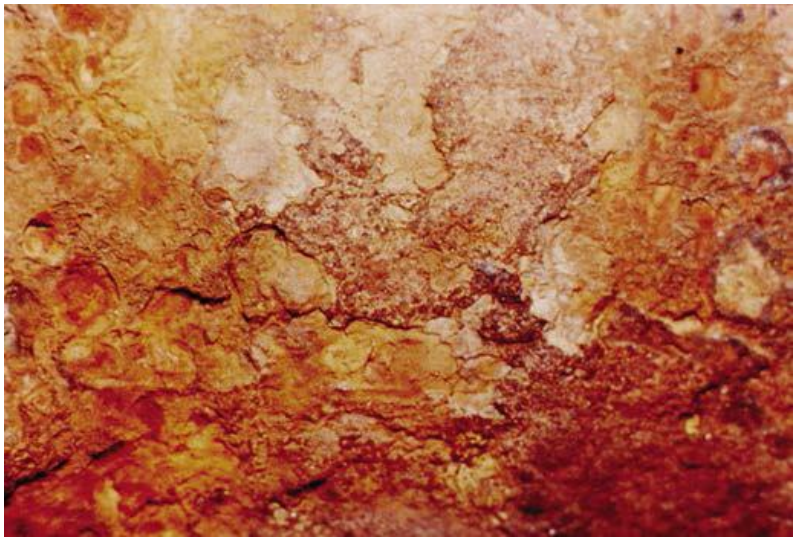


Figura 7: Corrosão uniforme ou generalizada em chapa metálica (GENTIL, 2007)

Corrosão puntiforme ou por pite: este tipo de processo corrosivo é caracterizado por desgaste em pontos específicos da superfície do material. A corrosão por pites é muito comum em materiais onde se observa a formação de películas protetoras, tal qual nos aços inoxidáveis. O processo corrosivo se inicia em pontos onde o filme passivo é rompido. Locais onde se encontram íons da família dos halogêneos

tais como cloretos (Cl^-), fluoretos (F^-), brometos (Br^-) e iodetos (I^-) podem acelerar essa corrosão sobre o aço inoxidável (GENTIL, 2007; NUNES, 2007)

Figura 8: Corrosão por pite em aço inoxidável austenítico 304 L (IBRAHIM, 2008)

Corrosão intergranular: corrosão esta ocorre nos contornos de grão dos material. A causa de tal fenômeno está relacionada com o tratamento térmico. Este tipo de processo corrosivo se origina pela diferença de composição entre a fase matriz e a região de contorno de grão. No caso particular dos aços inoxidáveis esse tipo de processo ocorre devido à precipitação de carbonetos de cromo no contorno do grão (GENTIL, 2007; NUNES, 2007)

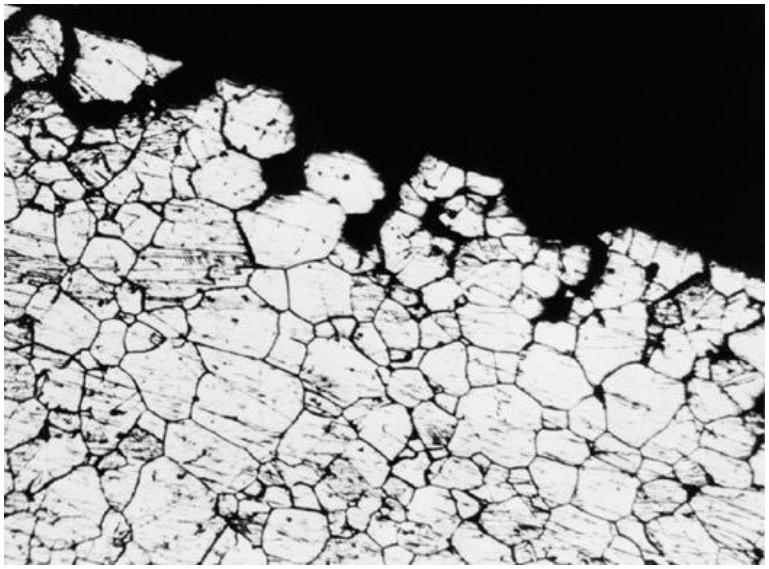


Figura 9: Corrosão intergranular (GENTIL, 2007)

Vários estudos vêm sendo realizados a respeito de como minimizar a corrosão nos materiais metálicos, tais como a utilização de revestimentos, inibidores, e até materiais altamente resistentes à corrosão que possam ser utilizados em meios onde a corrosão está mais presente (GENTIL, 2007).

Os aços inox austeníticos são conhecidos por apresentarem excelente resistência à corrosão, assim como outras propriedades, como por exemplo, boa resistência mecânica. O fenômeno da corrosão tem sido um desafio para muitas industrias, por exemplo, petroquímicas, que além de trabalhar com produtos altamente corrosivos no seu dia-a-dia, como sulfetos (S^{-2}), também contam com o ambiente marítimo, que possui íons cloreto (Cl^{-}), íons esses muito prejudiciais, que causam corrosão do tipo localizada (TAVARES, 2006; GIDEON, 2008).

A alta resistência à corrosão dos aços inox austeníticos se dá pelo fato dos mesmos possuírem elementos de liga em sua composição que forneçam tal resistência, como se seguem (CHIAVERINI, 2008):

- Cromo (Cr) – maior resistência à corrosão;
- Níquel (Ni) - maior resistência a corrosão;
- Molibdênio (Mo) - maior resistência a corrosão localizada, generalizada e por frestas;
- Nitrogênio (N) - maior resistência a corrosão localizada.

Segundo Senatore (2007), no caso especifico dos aços inoxidáveis austeníticos existem algumas expressões que auxiliam a relacionar a composição química com a resistência à corrosão do aço. De acordo com os autores o equivalente de resistência ao pite (pitting resistance equivalent), mais conhecido por sua sigla, PRE, é um dos mais utilizados. O PRE é um valor calculado com relação à porcentagem de Cr, Mo e N contidos na microestrutura dos aços (TAVARES, 2006).

$$PRE = \%Cr + 3{,}3x\ (\%Mo) + 16x\ (\%N)$$

O PRE pode ser tanto calculado para os aços inoxidáveis austeníticos quanto para os aços inox duplex. No entanto, os autores informam que o PRE deve ser usado como uma ferramenta qualitativa, a fim de estabelecer um ranking entre os diferentes tipos de aços (SENATORE, 2007; TAVARES, 2006).

Muitos trabalhos vêm sendo realizados a respeito da susceptibilidade à corrosão intergranular e por pite sobre aços inoxidáveis austeníticos. Além disso, pesquisas são feitas a respeito da influência das condições do meio corrosivo sobre os aços inox

austeníticos, tais como: concentração de ions cloreto, influência do pH, da temperatura etc. (WIKA, 2012; RAMANA, 2009; DIAS e CÃNDIDO, 2008; DOBOSZ, 2012;).

2.4.1 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS APLICADOS AO ESTUDO DA CORROSÃO

Existem diferentes métodos através dos quais é possível monitorar os mais diversos tipos de processos corrosivos. A velocidade do processo corrosivo é obtida em função da massa de material que foi consumida no processo corrosivo. Esta velocidade pode ser classificada em velocidade média de corrosão ou velocidade instantânea. Uma vez que a corrosão é um processo de natureza eletroquímica pode-se obter a massa do material degradado através da lei de Faraday (GENTIL, 2007; NUNES, 2007)

$$m = \frac{Kit}{F}$$

m = massa do metal que se dissolve

K = equivalente eletroquímico do metal

i = corrente de corrosão

t = tempo

F = constante de Faraday

Dessa forma, a medida da corrente de corrosão (i) é um modo de se obter informações sobre a velocidade e a intensidade do processo corrosivo. Os métodos eletroquímicos vêm sendo amplamente utilizados no monitoramento e na investigação dos processos corrosivos. O potencial de corrosão e o potencial de pite são exemplos de parâmetros eletroquímicos que podem ser aferidos mediante técnicas eletroquímicas e que auxiliam na investigação da corrosão dos materiais. (GENTIL 2007; NUNES 2007; WOLYNEC, 2003).

Existem diversos tipos de ensaios eletroquímicos aplicados ao estudo da corrosão, podendo-se citar dentre os mais utilizados: curvas de polarização, voltametria cíclica, ruído eletroquímico, impedância eletroquímica, reativação potenciocinética, etc (LOTO, 2012; SILVA, 2006; DÍAZ, 2013; WOLYNEC, 2003, SHERINE, 2010).

As Figura 10 e 11 apresentam exemplos típicos de ensaios eletroquímicos aplicados ao acompanhamento do comportamento eletroquímico dos materiais metálicos.

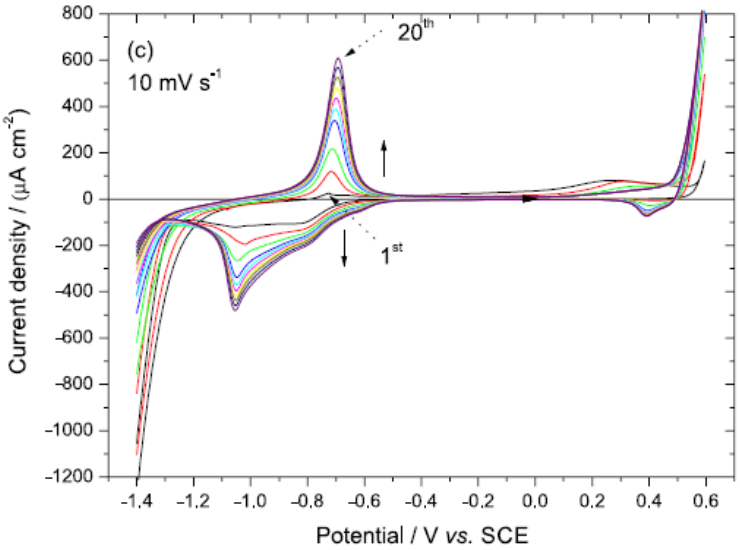


Figura 10: Curva de voltametria cíclica (ciclos de 1 a 20) em aço inox AISI 316L (DÍAZ, 2013)

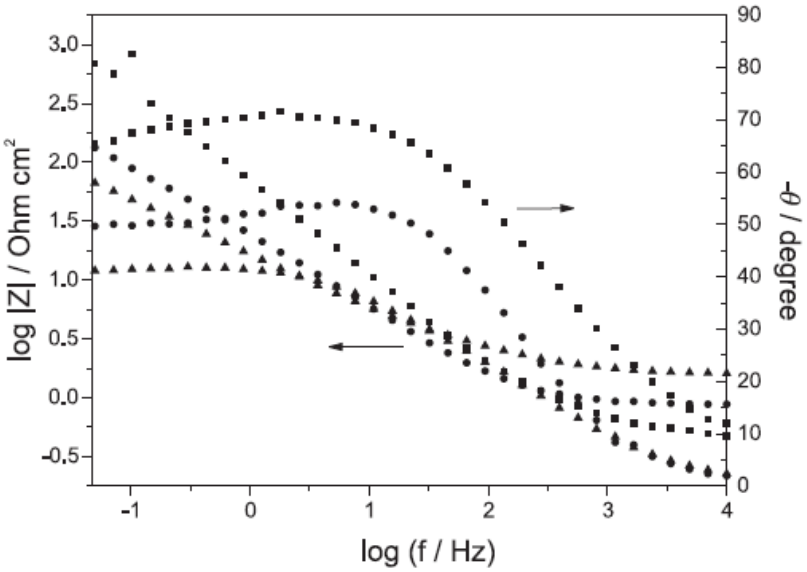


Figura 11: Ensaio eletroquímico de impedância realizado após voltametria cíclica do aço AISI 304 (AZAMBUJA, 2003)

2.4.2 CURVA DE POLARIZAÇÃO

A curva de polarização é utilizada para a investigação do comportamento corrosivo de diversos metais. Este método está entre os mais utilizados no estudo da corrosão. No caso do estudo de processos corrosivos a célula eletroquímica é composta principalmente pelo metal (eletrodo) e pelo meio corrosivo (eletrólito) (GENTIL, 2007).

Este tipo de método eletroquímico tem sido empregado no monitoramento da corrosão em aços inoxidáveis. Gentil, 2007 diz que existem comportamentos clássicos de polarização que são usualmente observados em sistemas metal/meios passíveis (como os aços inox austeníticos). Essas curvas estão representadas na figura 12 (GENTIL, 2007).

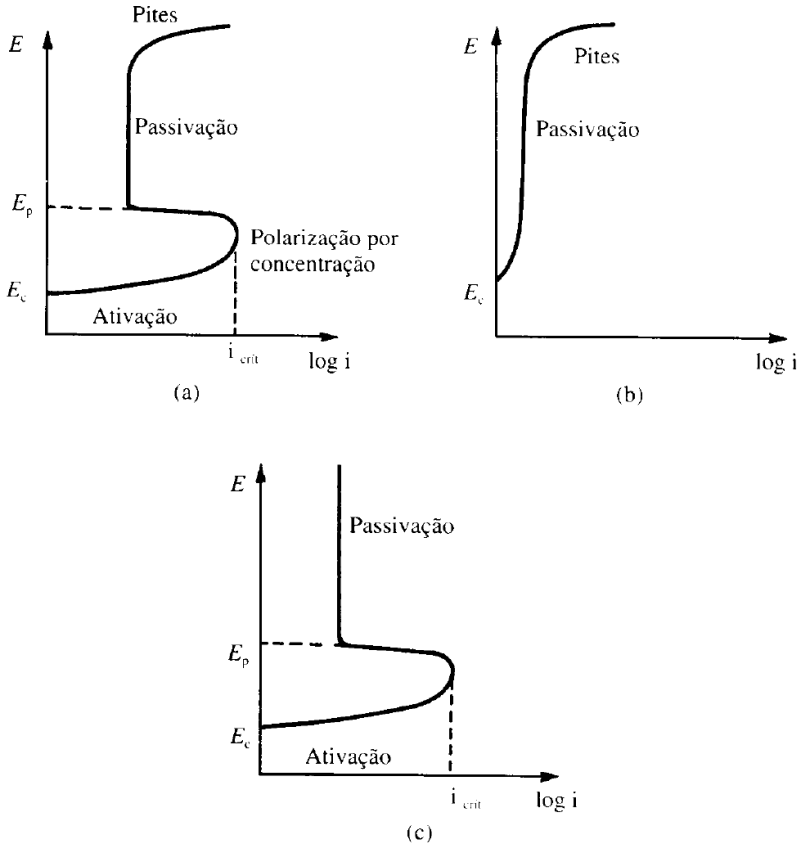


Figura 12: Curvas de polarização clássicas (GENTIL, 2007)

Através dos esquemas obtidos por Gentil (2007) os principais parâmetros de interesse nessas curvas são: a corrente crítica **(i_{crit})** que é a corrente máxima obtida para que o aço sofra passivação. O potencial em que o filme passivo é quebrado e desencadeia a corrosão por pite é chamado de potencial de pite **(E_{pite})**. O potencial de passivação **(E_P)** esquematizado na Figura 12b. Quanto mais próximo estiver do potencial de corrosão **(E_c)** indica que menor será a polarização para que o metal se passive. A curva (c) é uma representação da área em que o aço permanece passivo. A corrosão do mesmo pode ocorrer em potenciais mais altos (GENTIL, 2007; GIRÃO 2008).

A figura 13 representa um gráfico da curva de polarização potencial versus corrente (**E vs i)** de um sistema eletroquímico. O potencial de corrosão - **E_{cor}** e a corrente de corrosão **i_c** são obtidos pela interseção das curvas anódica e catódica. (GENTIL, 2007; MORONA, 2007).

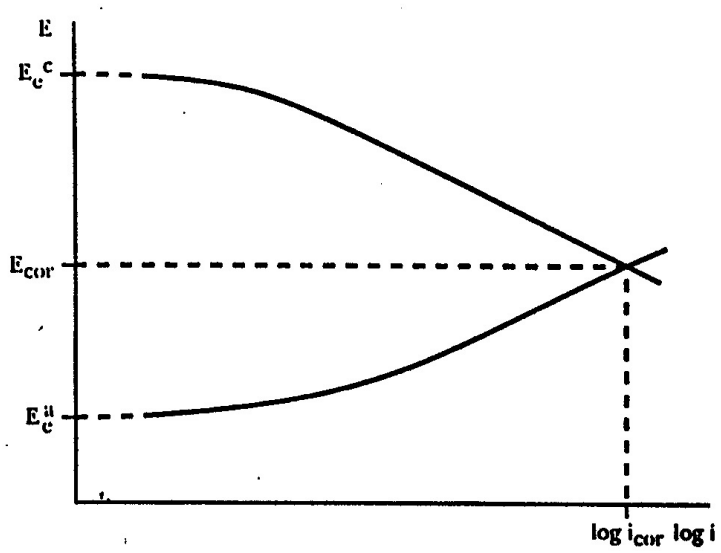


Figura 13: Gráfico de polarização anódica e catódica (MORONA, 2007 *apud* TICIANELLI e GONZALEZ, 1998)

. A figura 14 representa um ensaio eletroquímico de curva de polarização em aços 304L e 316L, realizado por Dobosz (2012). Nesta curva pode ser visto o potencial de corrosão dos aços que se encontram entre os potenciais de -200 e -400mV. O autor afirma não existir uma diferença significativa nos potenciais de corrosão dos aços estudados tem ambos os meios investigados.

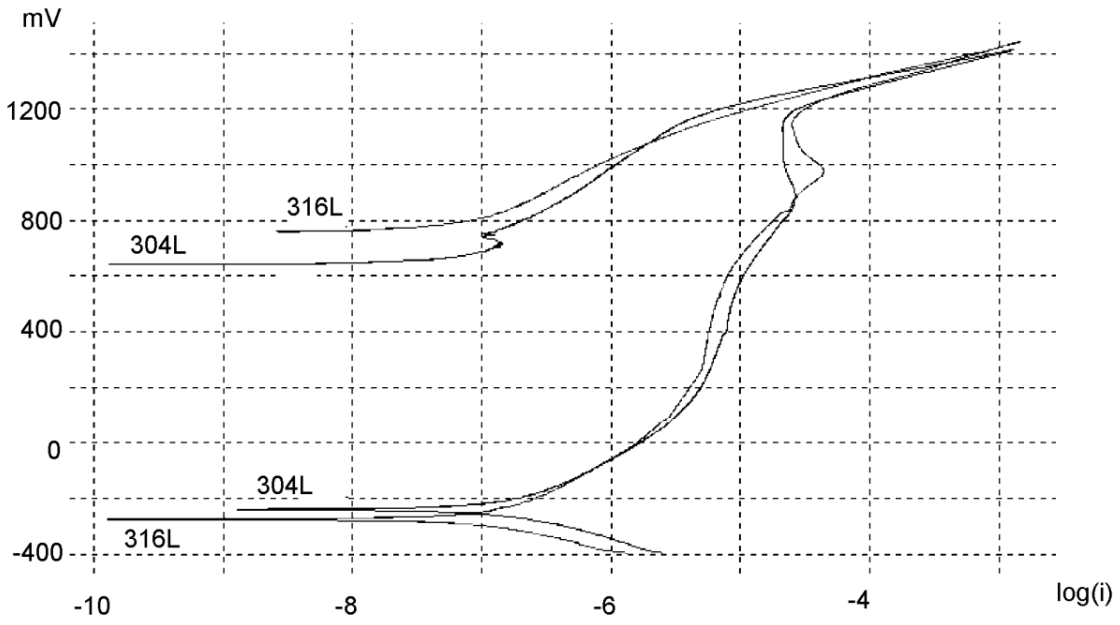


Figura 14: Comparação dos aços inoxidáveis austeníticos 304L e 316L em solução de 1g\L NaCl + 1g\L NaClO, pH 5,7 (DOBOSZ, 2012)

Loto e colaboradores (2012) utilizou a técnica de polarização para observar o comportamento do aço inoxidável 316 em ácidos fortes e meio de cloreto. Azambuja *et al* (2003) utilizou a polarização para observar o comportamento do ferro e do aço inox 304 em soluções contendo íons cloreto. Gjonnes (2012) utilizou a técnica de polarização para investigar o efeito da inclusão de sulfetos sobre a corrosão por pites em aços inoxidáveis austeníticos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CORPO DE PROVA

Foram utilizados três diferentes tipos de aços neste trabalho: aço carbono e aço inoxidável 304 e aço inoxidável 316. A composição química dos aços utilizados foi obtida por espectroscopia de emissão ótica.

O comportamento corrosivo dos aços inoxidáveis austeníticos 304 e 316 foi observado através de ensaios eletroquímicos realizados em diferentes meios e condições. A amostra de aço carbono foi escolhida com o objetivo de investigar a diferença da resistência à corrosão de um aço inox para com um aço que não contém elementos que forneçam proteção contra a corrosão. Essa comparação foi realizada juntamente com os aços inox 304 e 316.

3.2 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Antes dos ensaios eletroquímicos, as amostras metálicas no estado como recebido inicialmente foram cortadas com o auxílio de uma máquina de corte de bancada localizada no Laboratório Didático de Metalurgia (LDM). As amostras foram cortadas em pedaços com aproximadamente dois centímetros de altura e área variando entre 1 – 2 cm^2.

Após o corte, as amostras dos três diferentes tipos de aços foram lixadas com o auxílio de uma politriz de bancada localizada no LDM, através da utilização de lixas d'água seguindo a sequência de grão: 120, 220, 320, 400, 600 e 1500 mesh. O lixamento das amostras seguiu esta sequência antes de cada ensaio eletroquímico.

Para a obtenção da observação microestrutural das amostras além da sequência de lixamento mostrada acima, também foi realizado o polimento das amostras com pasta de diamante de 3 µm e 1 µm respectivamente. As etapas de lixamento e polimento são de grande importância para a observação microestrutural das amostras.

A microestrutura das amostras foi obtida por microscopia ótica (MO). Após lixamento e polimento as amostras dos aços inox 304 e 316 foram atacadas eletroquimicamente por soluções específicas descrita na tabela 2.

Tabela 2 – Ataques utilizados para revelar a microestrutura dos aços inoxidáveis

	Ataque	Composição	Tempo de Ataque
AISI 304	Eletroquímico – HNO_3	HNO_3 30%, 3 V	70 s
AISI 316	Eletroquímico – HNO_3	HNO_3 30%, 4 V	220 s

3.3 ENSAIOS ELETROQUÍMICOS

Os ensaios eletroquímicos foram realizados com o auxílio do potenciostato/galvanostato da marca AUTOLAB, modelo PGSTAT 302N, localizado no laboratório LPPM/UEZO. Para a obtenção dos ensaios/testes eletroquímicos foi utilizada uma célula eletroquímica de três eletrodos.

Esses ensaios têm o objetivo de realizar uma comparação do comportamento eletroquímico dos aços inoxidáveis austeníticos 304 e 316 em diferentes meios eletrolíticos. Para avaliar o efeito dos íons cloreto sobre a corrosão dos aços foram preparadas soluções em duas diferentes concentrações de cloreto de sódio, 3,5 (água do mar) e 25% (meio mais agressivo) utilizando reagentes de grau analítico (Marca VETEQ) e água destilada. O efeito da temperatura do meio oxidante sobre os aços inoxidáveis investigados neste trabalho foi obtido com o auxílio de uma placa de aquecimento. Também foram realizados ensaios eletroquímicos sobre a variação do pH da solução de NaCl 3,5% (pH 5,7 e pH 2).

Para a obtenção dos ensaios eletroquímicos as amostras dos aços 304 e 316 foram conectados a um fio de cobre, embutidos em resina epóxi e passaram por um tempo de cura de aproximadamente 48 horas.

O efeito do tratamento térmico sobre a microestrutura e o comportamento eletroquímico dos aços inox austeníticos 304 e 316 foram obtidos através de tratamento térmico da amostra em forno tipo mufla. Foi realizado tratamento térmico nas amostras de aços inox 304 e 316 a fim de verificar se a influência da temperatura no comportamento corrosivo dos aços nas condições testadas. As amostra foram inicialmente solubilizadas em forno a 1150ºC e em seguida temperadas em água. A

seguir foram tratadas a 600 e 700ºC por duas horas, seguidas de uma nova tempera em água.

A célula eletroquímica utilizada possui três entradas onde foram colocados os seguintes eletrodos: eletrodos de trabalho, referência e contra eletrodo, que são imersos no eletrólito para analise eletroquímica do comportamento do corpo de prova. Para realização dos ensaios eletroquímicos as amostras foram soldadas a um fio de cobre através do qual seria possível realizar o contato elétrico da amostra metálica (eletrodo de trabalho) com os demais eletrodos da célula. Após a soldagem as amostras foram embutidas em resina epóxi, a fim de que apenas uma face do eletrodo de trabalho entrasse em contato com o meio corrosivo.

A figura 15 mostra o esquema de célula utilizado no ensaio eletroquímico.

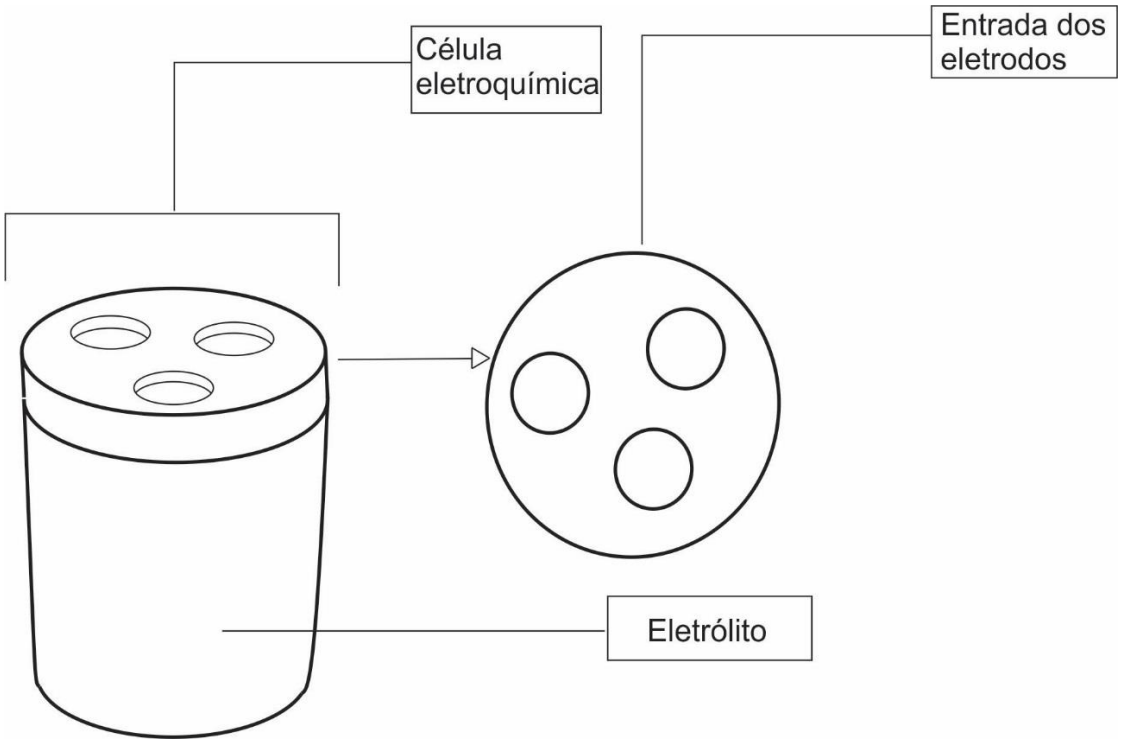


Figura 15: Esquema de célula eletrolítica

Os eletrodos utilizados foram:

- Contra-eletrodo: grafite
- Eletrodo de referência: calomelano
- Eletrodo de trabalho: amostras de aço 304 e 316 nas condições como recebidas e tratadas termicamente em 600 e 700ºC

A figura 16 mostra o esquema dos eletrodos utilizados no ensaio eletroquímico.

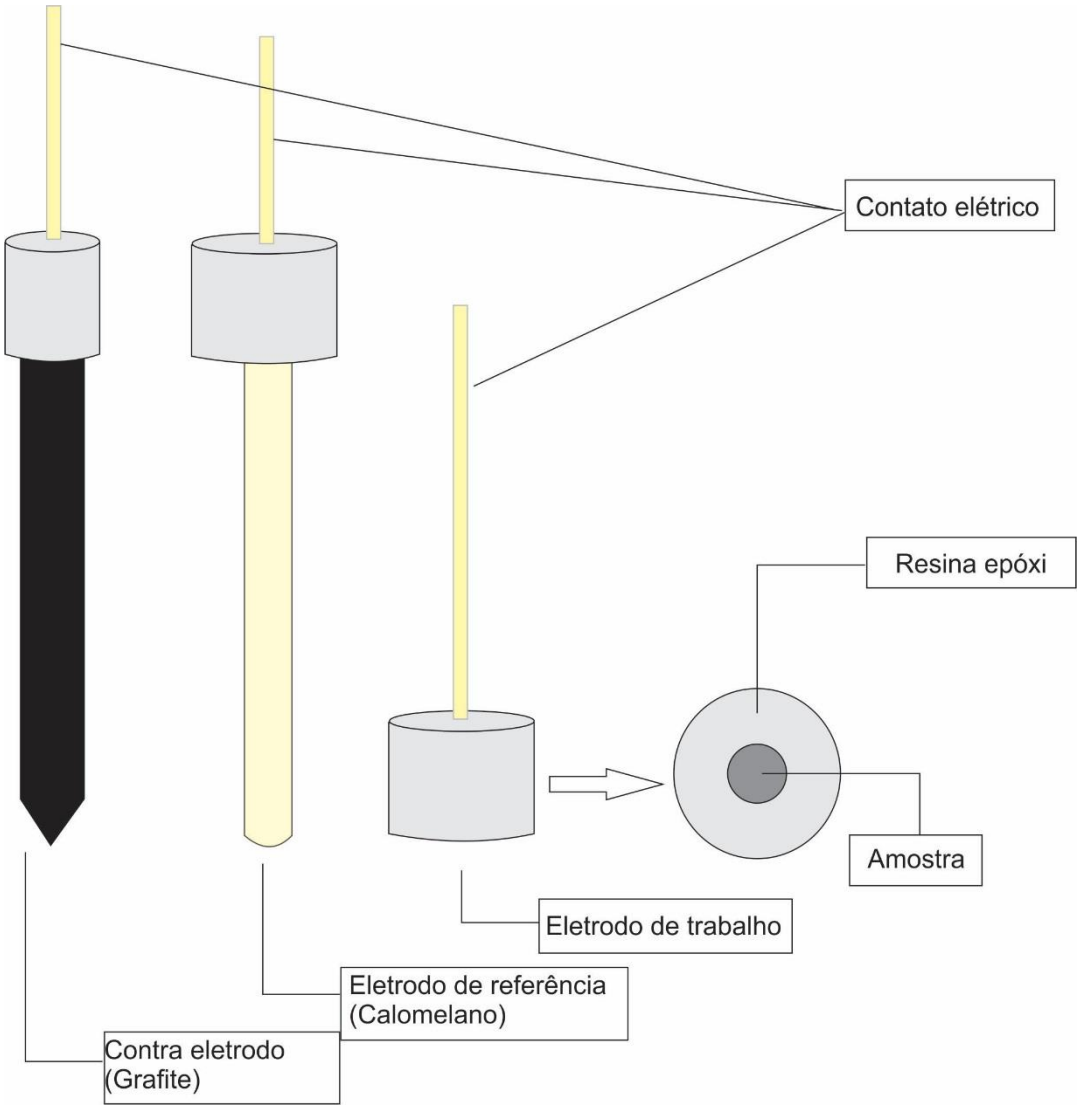


Figura 16: Esquema de eletrodos

Os ensaios eletroquímicos realizados consistiram de curva de polarização potenciodinâmica, obtidas no sentido anódico. O potencial inicial (E_i) partiu de -1V e a varredura foi realizada até o potencial final (E_f) de 1,5V. Essa varredura teve início após a estabilização do potencial de circuito aberto das amostras. A velocidade de varredura escolhida foi de 1mV/s. Antes de cada ensaio as amostras foram imersas na solução por um tempo ± 15 min, para a estabilização do potencial de circuito aberto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MICROESTRUTURA DOS AÇOS INOX AUSTENÍTICOS AISI 304 E 316

A tabela 3 representa a análise química dos aços inox AISI 304, AISI 316 e aço carbono.

Tabela 3: Análise Química dos aços AISI 304, AISI 316 e aço carbono

	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo
AISI 304	0,0670	1,02	0,0210	0,0380	0,468	18,36	8,09	0,187
AISI 316	0,0360	1,73	0,0230	0,0360	0,416	17,31	10,12	2,17
Aço carbono	0,610	0,660	0,0098	0,0099	0,188	0,042	0,031	0,058

Como pode ser visto na tabela 3, o aço carbono possui teores de elementos de liga muito baixos, pois são ligas ferro-carbono comuns, cujos elementos de liga provêm do processo de fabricação do aço. Já os aços inox AISI 304 e AISI 316, possuem altos teores de Cr e Ni, que promovem aos aços resistência à corrosão. No entanto, o aço inox AISI 304 possui teor de Cr maior que o aço inox AISI 316, enquanto este possui teor de Ni maior que o aço inox AISI 304. Esta diferença pode influenciar em uma diferença sobre a resistência à corrosão desses aços.

A Figura 17 apresenta as micrografias dos aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 316 na condição como recebido. A observação da microestrutura foi obtida através de microscopia ótica após realização de ataque químico em ambos os materiais. Verificou-se para ambos os aços na condição como recebido a presença de uma única fase - fase austenítica (γ).

No entanto o ataque utilizado revelou com mais eficiência a microestrutura do aço inox 304, é possível verificar que no caso do aço 304, houve uma maior revelação na região dos contornos de grão. Em ambos os aços verifica-se a presença de pontos pretos, sobretudo no aço 316. Este comportamento pode estar relacionado à formação de pites, provavelmente devido ao ataque utilizados para revela a microestrutura.

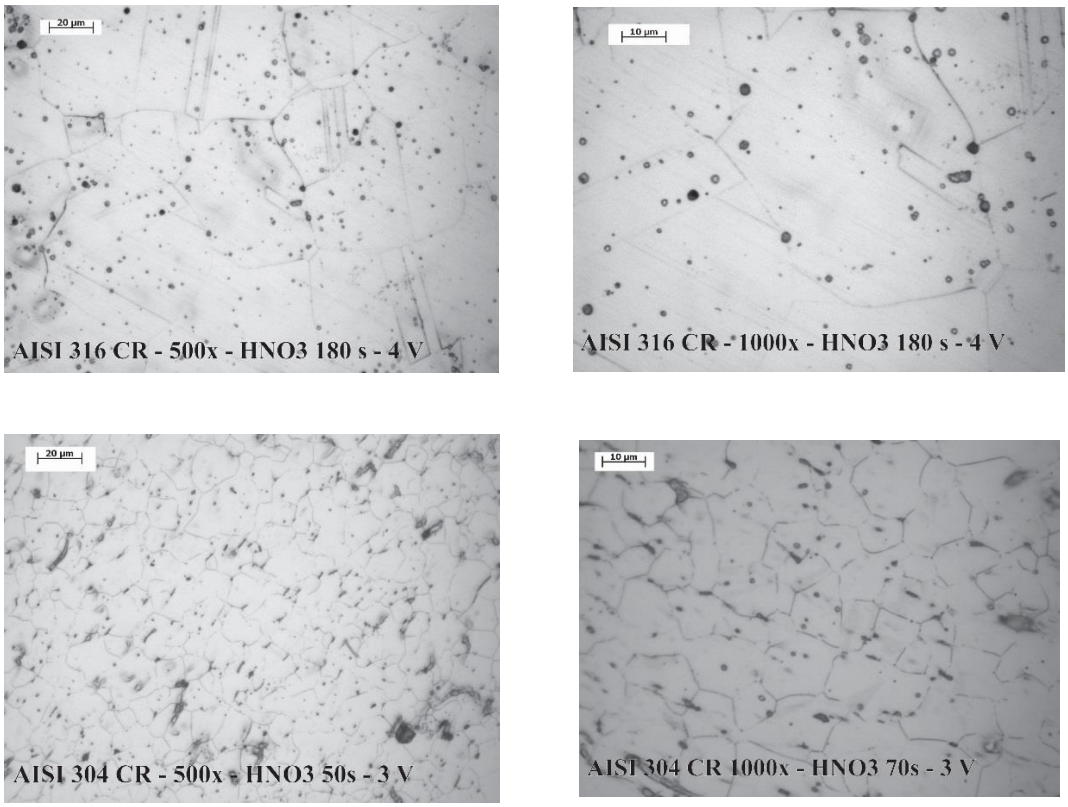


Figura 17: Microscopia ótica dos aços inox 304 e 316

4.2 COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO DOS AÇOS INOX AISI 304, AISI 316 E AÇO CARBONO

A Figura 18 apresenta a comparação das curvas de polarização anódicas obtidas em solução de NaCl 3,5% a temperatura ambiente para os aços inox AISI 304, AISI 316 e também para o aço carbono. Como era esperado os aços inox apresentam maiores potenciais de corrosão em comparação com o aço carbono, este comportamento é uma indicação da maior resistência à corrosão dos aços inox no meio investigado.

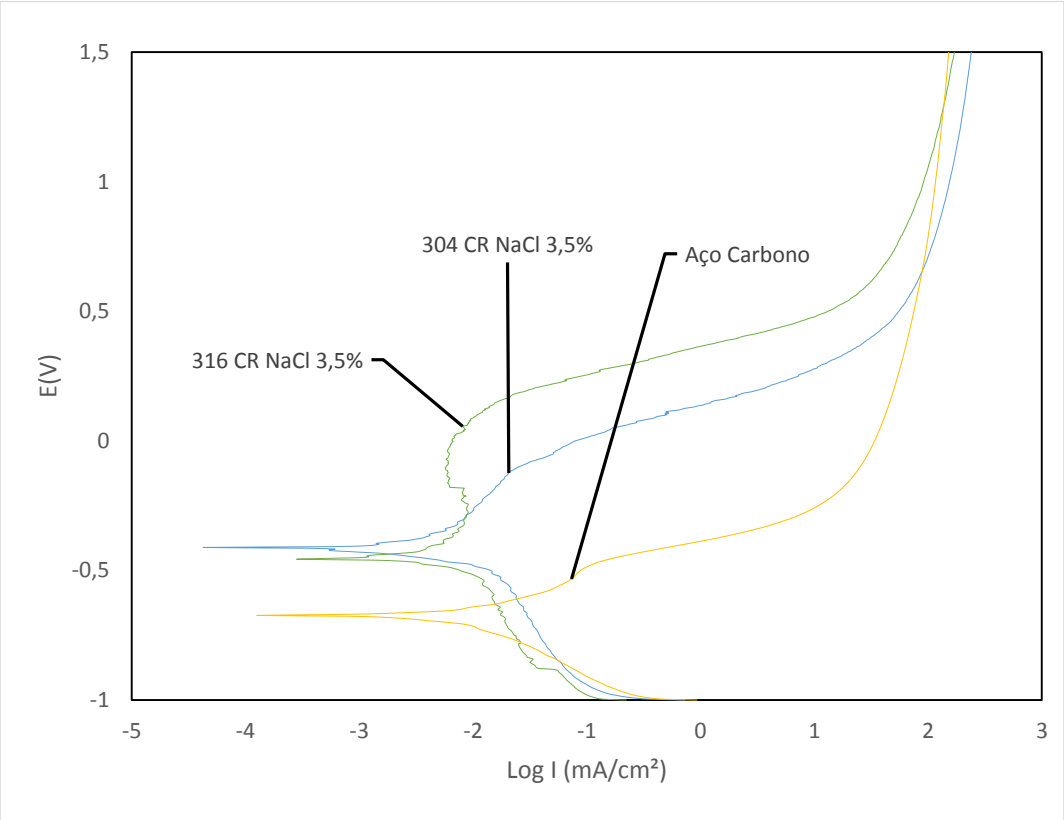


Figura 18: Curva de polarização dos aços inox 304, 316 e aço carbono em NaCl 3,5% a 1mV/s

Os valores dos potenciais de corrosão e potencial de pite dos três aços estudados são apresentados na tabela 4. Neste caso é possível verificar que o aço 316 apresenta um potencial de corrosão menos nobre que o aço 304 e um maior potencial de pite, sugerindo que em comparação com o aço 304 o aço 316 apresenta uma maior região de passivação.

Tabela 4: Potenciais de corrosão e de pite dos aços inox AISI 304 e AISI 316 e aço carbono em NaCl 3,5%

	Potencial de corrosão (mV)	Potencial de Pite (mV)
Aço AISI 316	-453,8	55,85
Aço AISI 304	-411,07	-124,21
Aço carbono	-673,52	-----

O potencial de corrosão é um dos indicativos da resistência à corrosão do material. Observa-se que ambos os aços inox apresentam um potencial de corrosão mais nobre quando comparados ao aço carbono. Dentre os aços inox, o 304 apresentou um potencial ligeiramente mais nobre que o 316. Isto poderia ser um indicativo da maior resistência à corrosão deste material. No entanto outros pontos também devem ser considerados. É possível verificar que a curva de polarização do aço 316 apresenta uma região de passivação (-396 a -56 mV) bem definida, enquanto que no aço 304 não se observa claramente nenhuma área passiva.

O potencial de pite (E_{pite}), é o local da curva de polarização onde a corrente apresenta um súbito aumento, geralmente ocasionado pela quebra do filme de passivação. Observando a Figura 18 é possível afirmar que o aço inox 316 apresenta um maior potencial de pite (E_{pite} ~ - 56 mV) que o aço 304 (E_{pite} ~ - 124 mV). Este comportamento é um claro indicativo da maior resistência à corrosão por pite do aço 316, nas condições estudadas.

O aço carbono não apresenta nenhuma área de passivação, e a densidade de corrente aumenta consideravelmente com o aumento do potencial. Este comportamento era esperado, pois a passivação ocorre devido à presença de elementos de liga, principalmente o cromo (Cr). Uma vez que a composição do aço carbono não apresenta teores significativos e cromo este comportamento já era esperado. Levando em consideração a discussão acima, pode-se afirmar que nas condições estudadas o aço inox AISI 316 mesmo com potencial de corrosão menos nobre que o do aço inox AISI 304, se mostra mais resistente a corrosão, pois apresenta um maior domínio de passivação e um maior potencial de pite.

A Figura 19 apresenta as imagens obtidas em microscópio ótico para todos os aços, a observação da superfície das amostras foi realizada após o ensaio eletroquímico, apresentado acima.

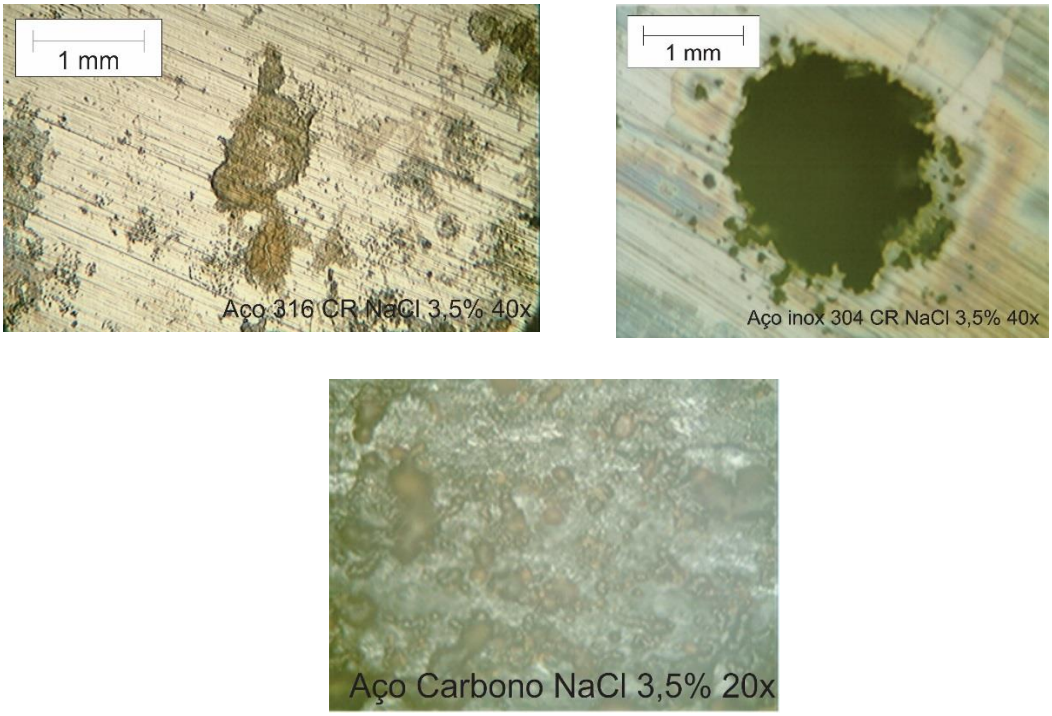


Figura 19: Microscopia ótica dos aços inox AISI 304, AISI 316 e aço carbono em NaCl 3,5%

As micrografias apresentadas acima corroboram os resultados observados através dos ensaios eletroquímicos. Como esperado a superfície do aço carbono apresentou apresenta um fenômeno de corrosão generalizada, onde toda a superfície da amostra se encontra recoberta por produtos de corrosão. Esse comportamento está diretamente associado às maiores densidades de corrente verificadas para o aço carbono, durante o ensaio eletroquímico. A explicação para esse fenômeno é que este material não possui elementos de liga que promovam uma maior resistência à corrosão.

A superfície das amostras dos aços 304 e 316 não apresentam sinais de corrosão generalizada como observado no aço carbono, no entanto foram observados alguns pontos de corrosão por pite. O aço inox 316 apresenta pequenos pontos de corrosão por pite, que se encontram espalhados ao longo da superfície. Por outro ladro, a micrografia obtida para o aço inox 304, evidencia pites maiores e mais pronunciados que o aço 316, o que corrobora os resultados dos ensaios eletroquímicos, onde foi verificado um menor potencial de pite para o aço 304, em comparação ao aço 316. Este comportamento confirma que o aço 316 é mais resistente à corrosão em meio de íons cloreto, nas condições estudadas. Essa maior resistência poderia ser explicada pela menor quantidade de cromo contido em sua no aço inox 304, o que aumentaria sua

susceptibilidade à corrosão localizada. Dobosz (2012) observou resultados semelhantes ao investigar o comportamento corrosivo do aço 316 em soluções de cloreto.

4.3 EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

A Figura 20 apresenta o gráfico das curvas de polarização onde se verifica o efeito da concentração de íons cloreto (3,5% e 25%) nos aços inox AISI 304 e 316.

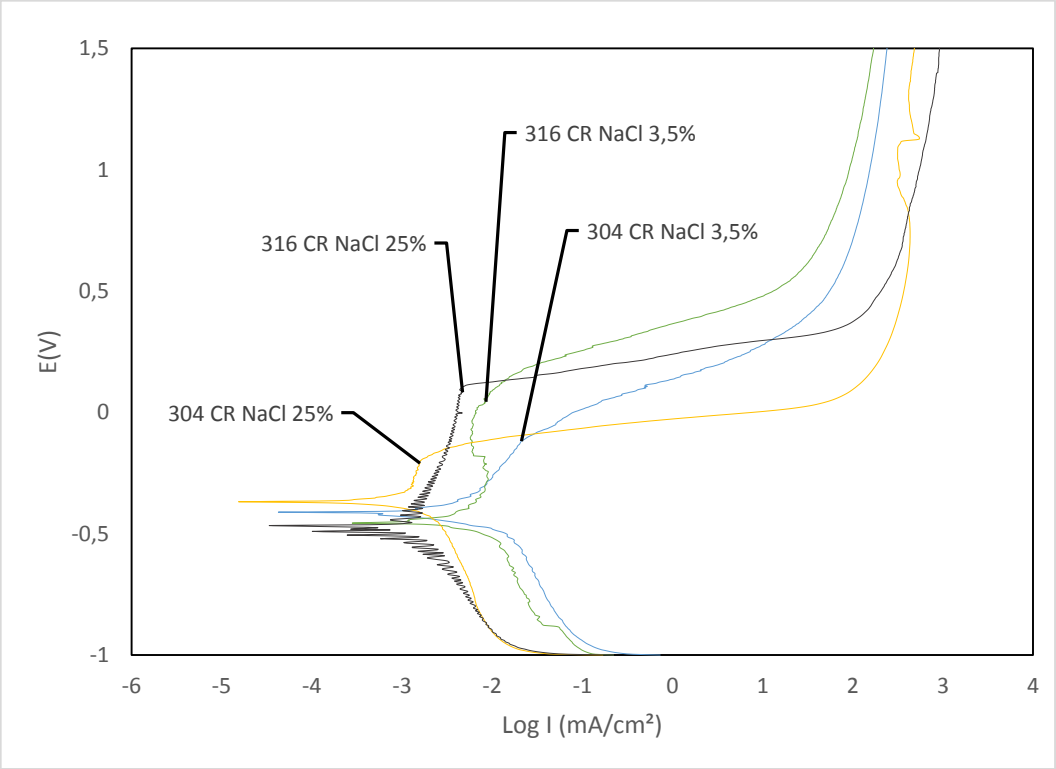


Figura 20: Curvas de polarização dos aços inox AISI 304 e AISI 316 em solução de NaCl 3,5 e 25% obtidas a 1mV/s

A tabela 5 mostra a comparação dos potenciais de corrosão e dos potenciais de pite para ambos os materiais obtidos nas duas diferentes concentrações de íons cloreto. As informações contidas na Tabela foram retiradas das curvas de polarização apresentadas nas Figuras 18 e 19.

Tabela 5: Potenciais de corrosão e de pite obtidos para os aços inox em NaCl 3,5% e NaCl 25%

	Potencial de corrosão (mV)		Potencial de Pite (mV)	
	NaCl 3,5%	NaCl 25%	NaCl 3,5%	NaCl 25%
Aço AISI 316	-453,8	-466	55,85	83,31
Aço AISI 304	-411,07	-368,35	-124,21	-209,66

O aumento na concentração de íons cloreto íons cloreto não provocou variações significavas nos potenciais de corrosão de ambos os aços. Contudo a variação é um pouco maior para o aço 304 que para o aço 316. Resultados obtidos por Dobosz (2012) onde foi investigado o efeito dos íons cloreto sobre estes aços também mostram pouca variação do potencial de corrosão.

Observa-se que para ambos os aços 304 e 316 ocorre uma diminuição da região de passivação com o aumento da concentração de íons cloreto. No entanto essa diminuição é ainda mais pronunciada para o aço inox 304, isto ocorre devido à um aumento no potencial de corrosão e uma diminuição do potencial de pite, provocando um estreitamento da área passiva e um provável aumento da corrosão por pite.

O aço inox 316 também apresenta uma diminuição da área passiva, principalmente devido à redução do potencial de pite, uma vez que o potencial de corrosão deste material praticamente não apresentou variação com o aumento da concentração de íons cloreto. No entanto, a diminuição da região de passivação é mais significativa para o aço 304, o que sugere que este material é mais susceptível ao aumento da concentração de cloreto no meio oxidante.

Dobosz (2012) encontrou resultados similares, nos quais, o aço AISI 304 perde mais facilmente a resistência à corrosão em maiores concentrações de cloreto, enquanto o aço inox AISI 316 apesar de também ser susceptível ao aumento de íons cloreto no meio, ainda apresenta maior resistência que o aço 304.

A Figura 21 apresentam uma comparação das micrografias obtidas após os ensaios eletroquímicos nos meios com maior e menor concentração de cloreto.

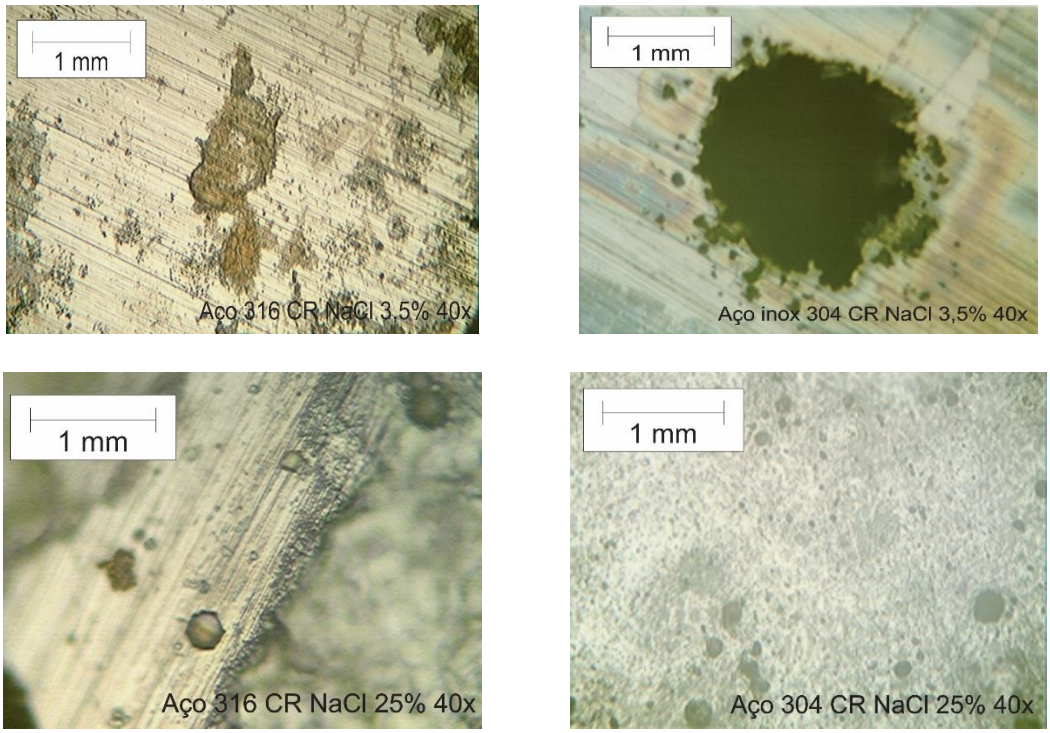


Figura 21: Microscopia ótica dos aços inox AISI 304, AISI 316 em NaCl 3,5% e 25%

Os resultados observados nas micrografias corroboram os ensaios eletroquímicos. É possível verificar um aumento do número de pites sobre a superfície de ambos os aços, no entanto esse aumento é mais significativo para o alo 304.

A explicação para a ocorrência de um ataque maior sobre os aços inox acima é de que, com o aumento da concentração de íon cloreto, a quebra do filme passivo ocorre com mais facilidade, aumentando à susceptibilidade a corrosão desses materiais, o que provoca um aumento do número e do tamanho dos pites.

4.4 EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO

As curvas de polarização apresentadas nas Figuras 22 e 23 mostram o efeito do tratamento térmico sobre o comportamento eletroquímico para os aços inox 304 e 316. As Figuras mostram a comparação entre as curvas obtidas nos respectivos materiais na forma como recebido e termicamente tratado a 600 e 700°C (envelhecimento do material). A tabela 6 mostra os potenciais de corrosão dos aços obtidos através das curvas de polarização.

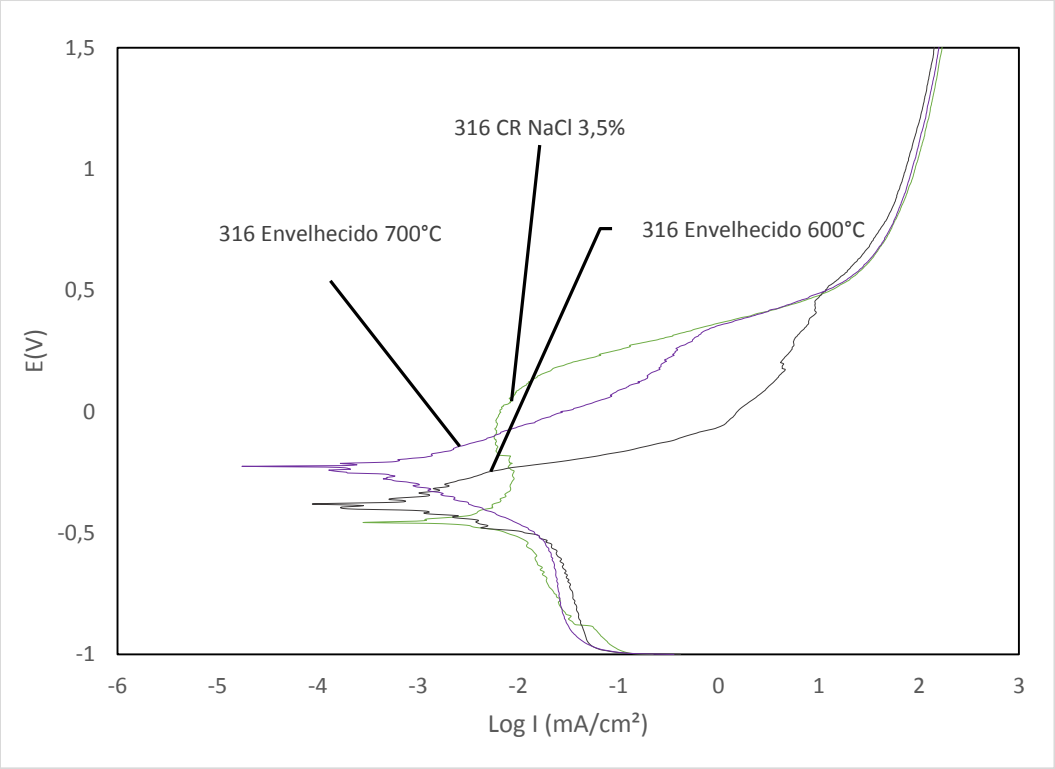


Figura 22: Curvas de polarização do aço inox AISI 316 nas condições CR, e envelhecido 600 e 700°C em NaCl 3,5% a 1mV/s

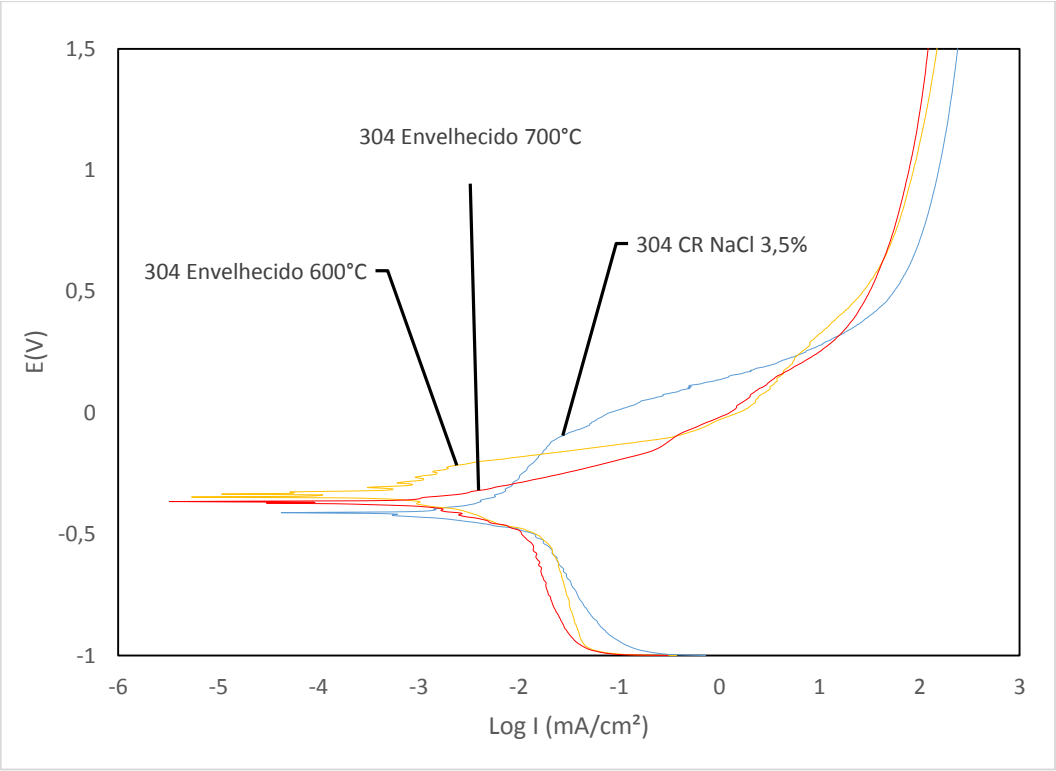


Figura 23: Curva de polarização do aço inox AISI 304 nas condições CR, e envelhecido 600 e 700°C em NaCl 3,5% a 1mV/s

Tabela 6: Potenciais de corrosão dos aços inox AISI 304 e AISI 316 envelhecidos em NaCl 3,5%

	Potencial de corrosão (mV)		
	CR	**Envelhecido 600ºC**	**Envelhecido 700ºC**
Aço AISI 316	-453,8	-377,5	-224,91
Aço AISI 304	-411,07	-334,78	-365,3

Observa-se que no caso do aço inox 316 o tratamento térmico provocou um deslocamento do potencial de corrosão para potenciais mais nobres, ao mesmo tempo que causou uma diminuição do potencial de pite, de tal forma que não é possível observar claramente uma região passiva nos aços termicamente tratados. Esses efeitos provocaram o desaparecimento da região passiva, ou seja o processo corrosivo se inicia a partir do potencial de circuito aberto, sem nenhuma queda da corrente, sugerindo que o tratamento térmico em ambas as temperaturas provocou uma aceleração do processo de corrosão por pites. A curva de polarização obtida a 600ºC apresentou maiores densidades de corrente no ramo anódico que as obtidas a 700º, isso poderia ser um

indicativo que a temperatura de 600º teria um efeito mais deletério sobre o material. No entanto esse comportamento deverá ser confirmado através da realização de ensaios com potencial fixo e ensaios de DL-EPR.

O tratamento térmico também provocou um descolamento dos potenciais de corrosão do aço 304, no entanto não houve diferença significativa entre as duas diferentes temperaturas de tratamento. Não é observada passivação nas curvas obtidas para os aços envelhecidos. Assim como o aço inox AISI 316, o aço 304 apresenta uma maior resistência à corrosão em condição como recebido mas ao contrário do 316 as curvas sugerem que o tratamento a 700°C foi mais deletério à resistência a corrosão desse material. Esses resultados no entanto, devem ser complementados com outros ensaios eletroquímicos. Contudo é possível afirmar que o tratamento térmico em ambas as temperaturas reduziu a resistência à corrosão de ambos os materiais.

Rocha Junior (2011) diz que a faixa de temperatura em que os aços inoxidáveis austeníticos são submetidos a sensitização está entre 500 e 850°C, ou seja, a perda de resistência a corrosão dos aços inox AISI 304 e AISI 316 pode estar ligada ao empobrecimento dos contornos de grão pelo carbonetos de cromo ($Cr_{23}C_6$).

Desta forma, é possível que o comportamento eletroquímico dos aços termicamente tratados esteja relacionado com o empobrecimento de cromo na fase matriz dos aços 304 e 316.

As micrografias obtidas pós ensaios eletroquímicos para os aços termicamente tratados são apresentadas na Figura 24. A observação da superfície das amostras corrobora os ensaios eletroquímicos, uma vez que é possível verificar que o fenômeno da corrosão por pites é claramente acelerado nas amostras termicamente tratadas.

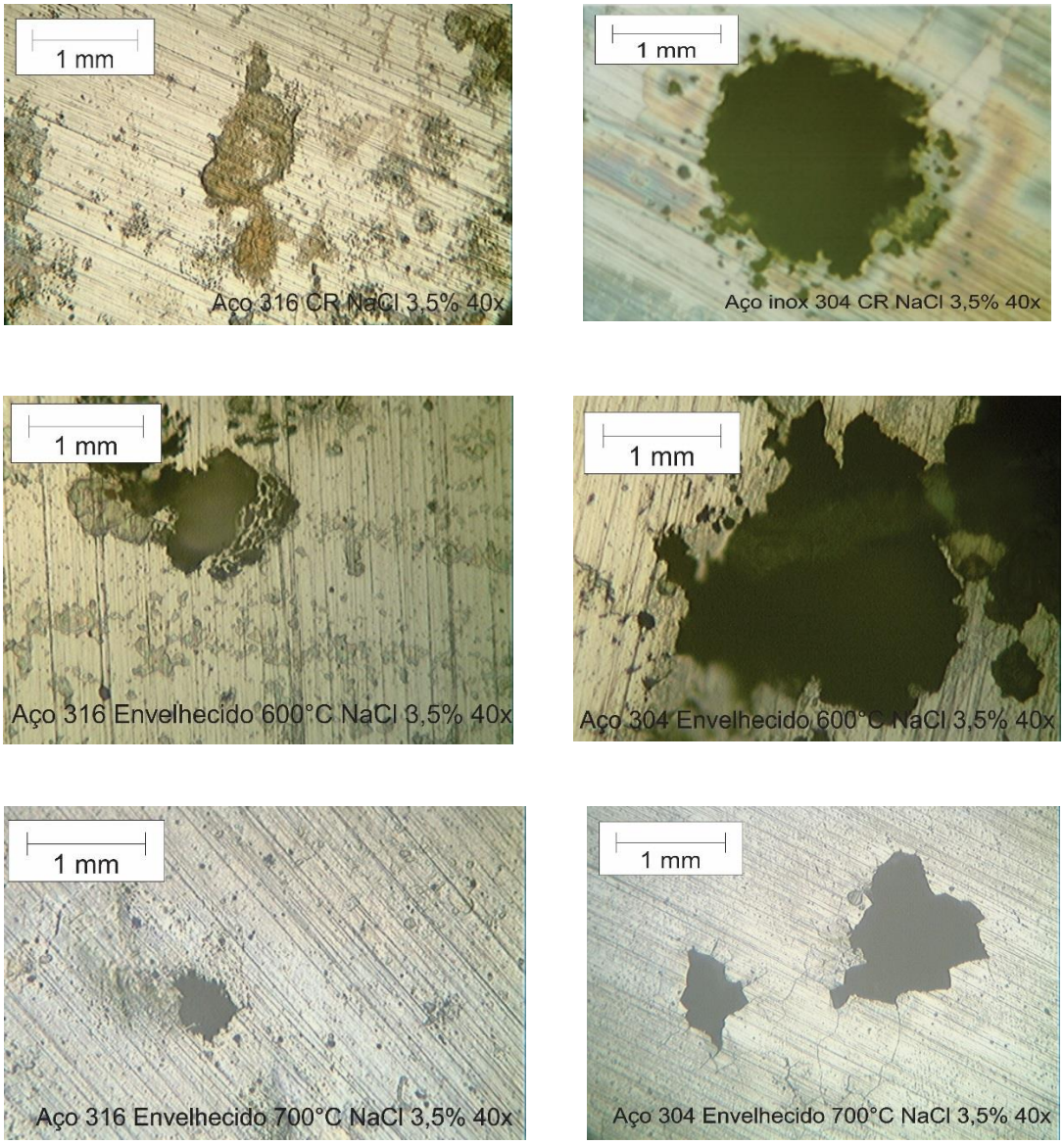


Figura 24: Microscopia ótica dos aços inox AISI 304 e AISI 316: nas condições CR e envelhecidos 600 e 700°C, após ensaio eletroquimico em NaCl 3,5%

As micrografias obtidas para o aço 316 mostra um aumento do tamanho e do número de pites na condição envelhecido 600°C, se comparado ao envelhecido 700°C e na condição como recebido. Este comportamento corrobora os ensaios eletroquímicos onde foram observadas maiores densidades de corrente anódica para a amostra tratada a 600°C.

No aço inox AISI 304, o comportamento é similar, a corrosão por pite mais aumenta consideravelmente nas amostras termicamente tratadas. Contudo, ao comparar os dois tipos de aço, pode-se afirmar que o aço 316 é mais resistente que o aço 304, mesmo após tratamento térmico.

No entanto, o efeito do tratamento térmico deverá ser melhor investigado através de ensaios eletroquímicos complementares (cronoamperometria, DL-EPR) e observação microestrutural (microscopia eletrônica de varredura).

4.5 EFEITO DO PH DA SOLUÇÃO SOBRE A CORROSÃO DOS AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS

A figura 25 mostra o efeito do pH do meio oxidante sobre a resistência a corrosão dos aços inox 304 e 316. Os ensaios foram obtidos em meio de cloreto em dois diferentes pH: o pH da solução (~5,7) e pH mais ácido (pH =2). A tabela 7 apresenta os potenciais de circuito aberto e os potenciais de pite dos materiais obtidos através das curvas de polarização.

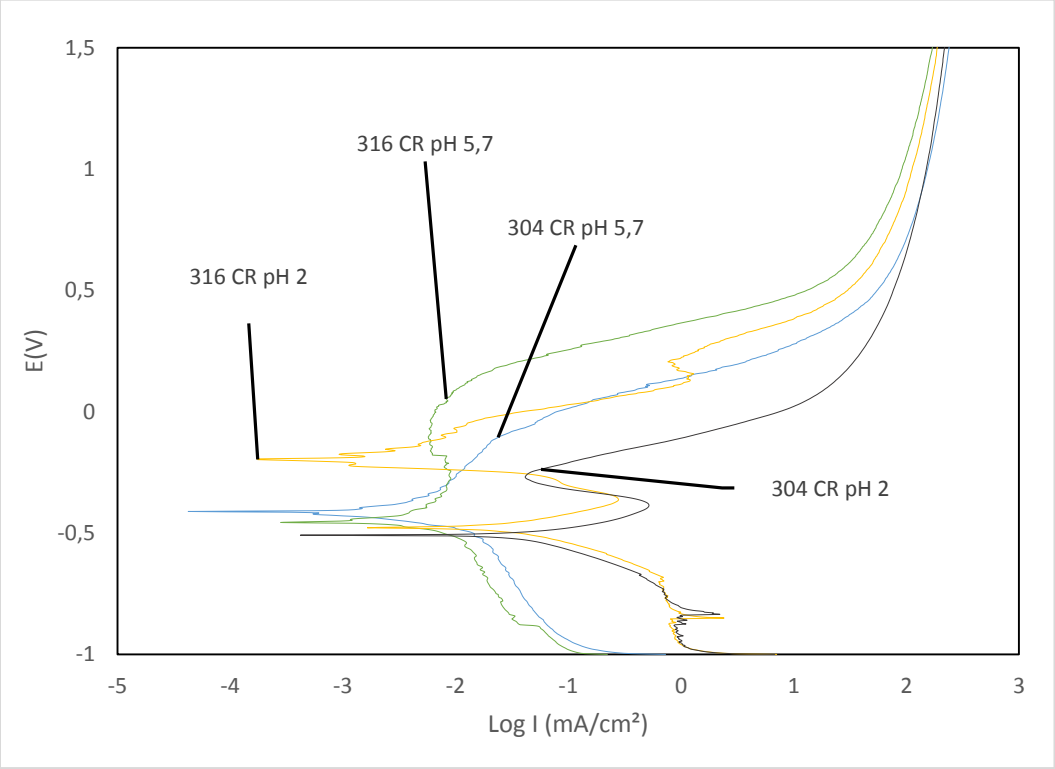


Figura 25: Curvas de polarização dos aços inox AISI 304 e AISI 316 em NaCl 3,5% pH 5,7 e pH2 obtidas a 1mV/s

Tabela 7: Potenciais de corrosão e de pite dos aços inox AISI 304 e AISI 316 CR em NaCl 3,5% pH 5,7 e pH2

	Potencial de corrosão (mV)		Potencial de pite (mV)	
	NaCl 3,5% pH5,7	NaCl 3,5% pH2	NaCl 3,5% pH5,7	NaCl 3,5% pH2
Aço AISI 316	-453,8	-478,21	55,85	-197,45
Aço AISI 304	-411,07	-508,73	-124,21	-237,12

Observa-se que a diminuição do pH do meio provoca um deslocamento do potencial de corrosão de ambos os materiais para potenciais mais catódicos, no entanto, esse deslocamento é mais pronunciado para o aço 304.

Verifica-se para ambos os aços a presença de uma corrente crítica na curva de polarização, obtida em pH 2. Após esse pico de corrente, a corrente cai e o aço entra na região de passivação. Essa mudança no comportamento da corrente é chamada transição ativo-passiva, e já havia sido observada por Gentil (2007). Dias (2008), também observou em seu trabalho os aços apresentam esta transição ativo-passiva e correntes críticas, à medida que o pH da solução se torna mais ácido.

Verifica-se nas curvas de polarização que a faixa de potencial considerada passiva (após a transição ativo-passiva e antes do segundo aumento da corrente) é estreita e a corrosão por pites se inicia em menores potenciais quando comparados com os aços imersos em pH mais elevado (pH da solução). Em pH 2 o aço 304 apresenta i_{crit} de -0,29 mA/cm² e potencial de pite de -237,95mV. Por sua vez o aço inox 316, apresenta corrente critica (i_{crit}) de -0,47mA/cm², potencial de pite de -197,45mV. Esses dados sugerem que o aço 304 poderia ser mais susceptível à corrosão em pH mais ácido em comparação com o aço 316.

A figura 26 mostra as microscopias óticas dos aços AISI 304, AISI 316 obtidas após os ensaios eletroquímicos mostrados acima.

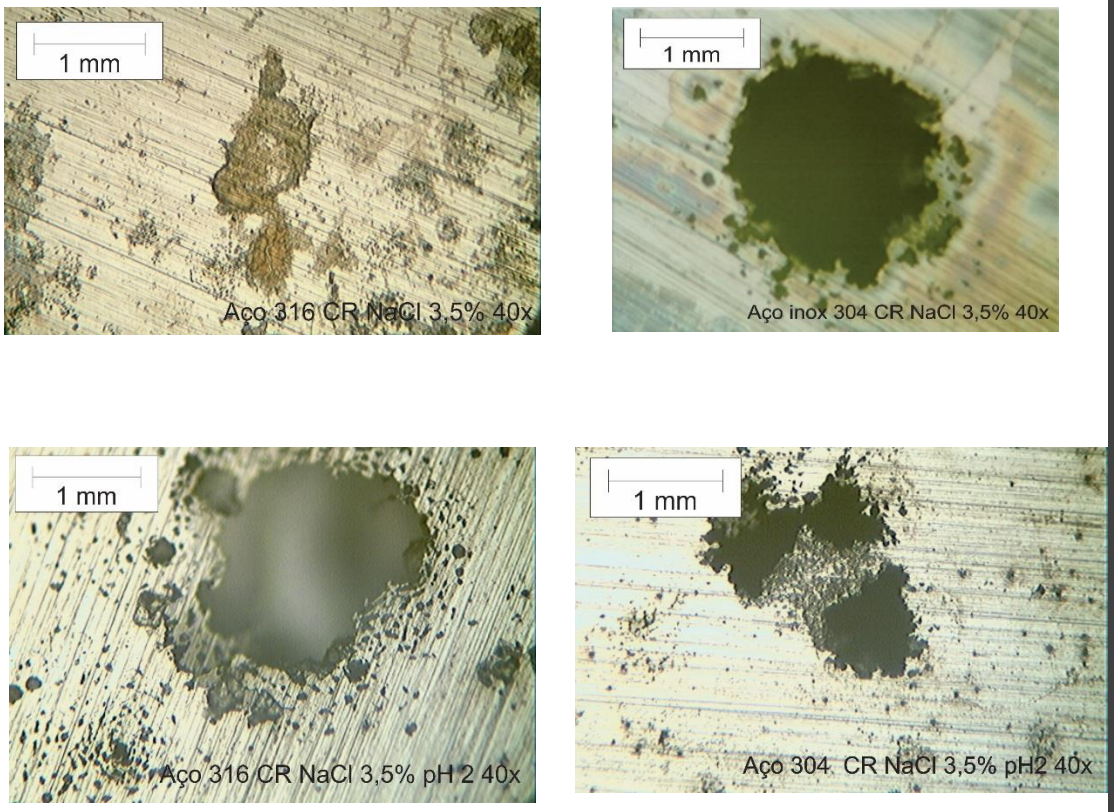


Figura 26: Microscopia ótica dos aços inox AISI 304 e AISI 316 em NaCl 3,5% pH 5,7 e pH2

Observa-se que com a acidificação do meio eletrolítico, há um aumento no tamanho dos pites formados se comparado ao meio quase neutro (pH 5,7). No entanto nesse pH não existe uma diferença na superfície desses materiais que indique uma variação considerável na resistência à corrosão dos dois materiais.

O efeito do pH sobre a resistência à corrosão dos aços inox 304 e 316 deverá ser melhor observado em trabalhos futuros.

4.6 EFEITO DO AQUECIMENTO DA SOLUÇÃO DE NACL 3,5%

As figuras 27 e 28 mostram o efeito do aquecimento da solução sobre o comportamento eletroquímico dos aços AISI 304 e AISI 316. Os materiais foram testados em NaCl 3,5% em três diferentes temperaturas (ambiente, 40 e 70°C). A Tabela 8 apresenta os potenciais de corrosão e potenciais de pite obtidos através das curvas de polarização.

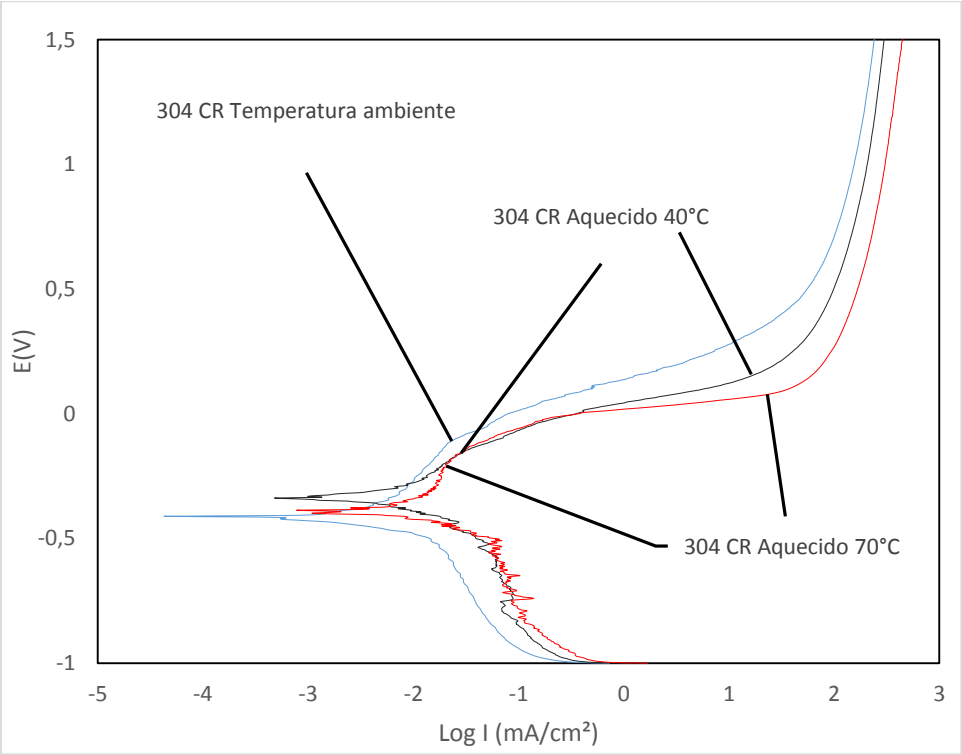


Figura 27: Curva de polarização do aço inox AISI 304 em NaCl 3,5% em temperatura ambiente e aquecido 40 e 70°C a 1mV/s

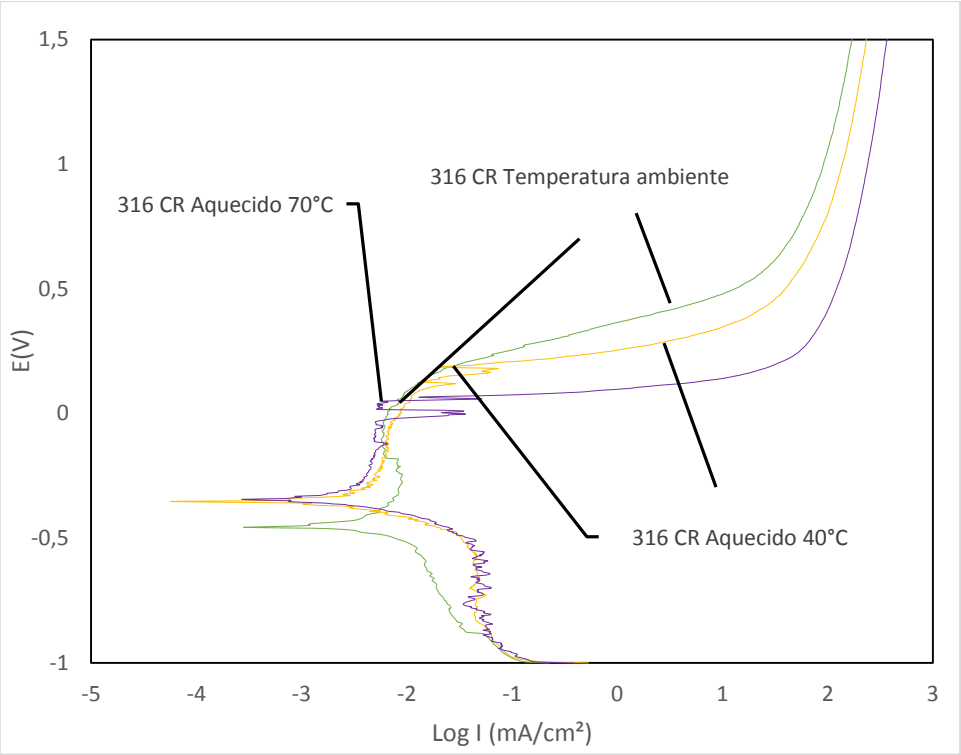


Figura 28: Curva de polarização do aço inox AISI 316 em NaCl 3,5% em temperatura ambiente e aquecido 40 e 70°C a 1mV/s

Tabela 8: Potenciais de corrosão e de pite dos aços inox AISI 304 e AISI 316 CR em NaCl aquecido

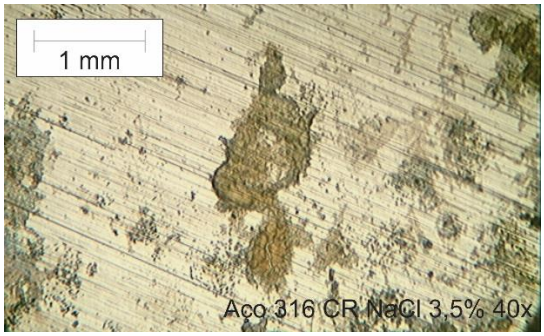
	Potencial de corrosão (mV)			Potencial de pite (mV)		
	T ambiente	40ºC	70ºC	T ambiente	40°C	70°C
Aço AISI 316	-453,8	-353,09	-346,98	55,85	46,69	-54,02
Aço AISI 304	-411,07	-337,83	-398,86	-124,21	-157,78	-209,66

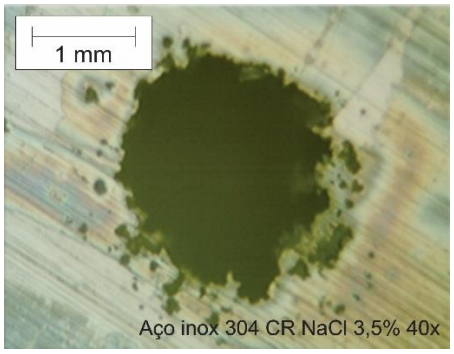
Analisando a tabela 8, observa-se que o aumento da temperatura da solução provoca um aumento do potencial de corrosão (deslocamento para potenciais mais anódicos) e uma diminuição do potencial de pite para o aço inox 316. Esse comportamento é um indicativo de que o aumento da temperatura provoca uma maior

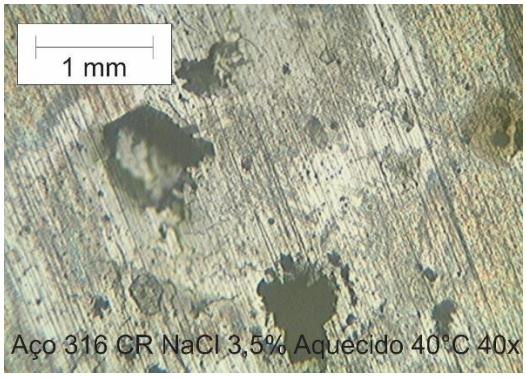
susceptibilidade à corrosão por pite do aço 316. No entanto não se observam diferenças significativas entre as temperaturas de 40 e 70ºC.

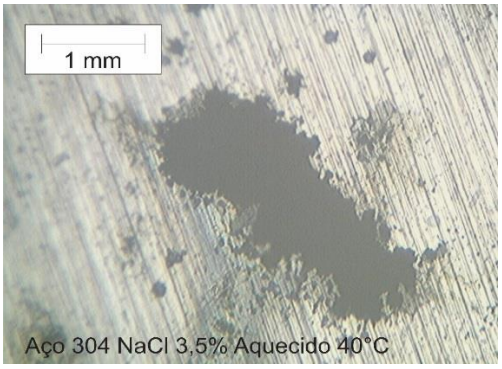
Uma tendência similar é verificada no aço inox 304. Neste caso não se observa região passiva nas amostras submetidas à solução aquecida, e verifica-se um aumento da corrente anódica, sugerindo que o aumento da temperatura da solução catalisa o processo de corrosão por pite. Do mesmo modo que no aço 316 não se nota diferença significativa ente as temperaturas de 40 e 70ºC. Comparando os resultados, pode-se afirmar de um modo geral que o aço 316 apresentou um melhor desempenho que o aço 304.

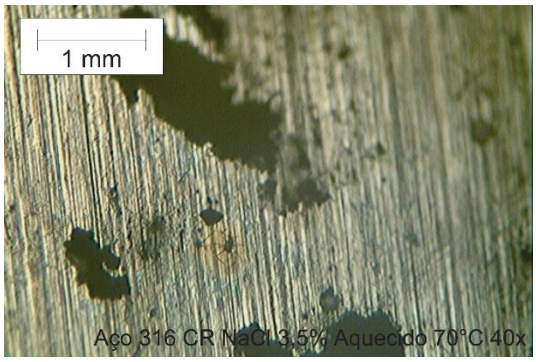
A Figura 29 apresenta a observação da superfície das amostras após os ensaios eletroquímicos apresentados acima. A superfície do aço inox AISI 316 corrobora com as curvas de polarização. Verifica-se que o aumento da temperatura da solução ocorre um aumento do tamanho dos pites. O aço inox AISI 304 mostra pites maiores e mais alongados do que aqueles observados no aço AISI 316, para as duas variações de temperatura da solução de exposição.











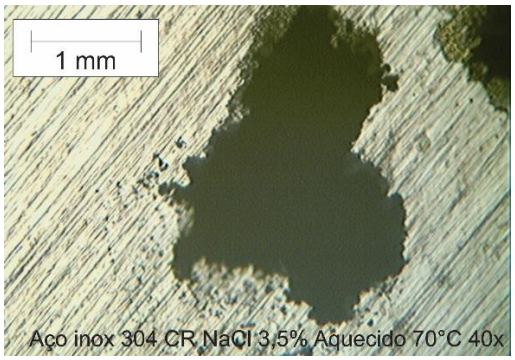


Figura 29: Microscopia ótica dos aços inox AISI 304 e AISI 316 nas condições CR em NaCl 3,5% em temperatura ambitente e aquecido à 40 e 70°C

5. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo investigar a relação entre as condições do meio oxidante e o comportamento corrosivo dos aços inoxidáveis austeníticos AISI 304 e 316. Baseados nos resultados obtidos através dos ensaios eletroquímicos e da observação da superfície das amostras pode-se concluir que:

- Em solução que simula o ambiente marinho (NaCl 3,5%), os resultados indicam que o aço inox 316 possui maior resistência à corrosão se comparado ao inox 304 e ao convencional aço carbono. O aço carbono sofre um processo de corrosão generaliza, enquanto que os aços inox apresentam um processo de corrosão por pite, sendo que o aço 316 apresentou uma maior resistência a este processo corrosivo que o aço 304.
- Observou-se que o aumento da concentração de íons cloreto na solução provocou uma diminuição da resistência à corrosão por pite em ambos os aços inoxidáveis, sendo este efeito mais pronunciado no aço 304.
- O tratamento térmico realizado nas temperaturas de 600 e 700°C provocou de um modo geral uma diminuição da resistência a corrosão nos aços 304 e 316. No entanto estudos mais detalhados com outras técnicas devem ser realizados para melhor avaliar a relação entre o tratamento térmico e a resistência à corrosão por pite desses materiais.
- A diminuição do pH do meio oxidante provocou uma mudança na região de passivação de ambos os aços inoxidáveis. Em pH mais ácido observou-se a formação de uma região de transição ativo-passiva, que provocou uma consequente diminuição no potencial de pite, acelerando o processo corrosivo. Comparando o comportamento dos dois aços, inox 316 se mostrou mais resistente mesmo em ambiente mais ácido.
- A temperatura do meio corrosivo também apresentou influencia no comportamento corrosivo dos aços. Verificou-se que o aumento da temperatura provoca uma diminuição na resistência à corrosão em ambos os materiais. O efeito da temperatura do meio deve ser melhor observado em estudos futuros.

De um modo geral, pode-se concluir que entre os aços inox investigados o AISI 316 apresenta uma maior resistência à corrosão, nas condições investigadas neste estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZAMBUJA, D. S.; MARTINI, E. M. A.; MÜLLER, I. L. **Corrosion Behaviour of Iron and AISI 304 Stainless Steel in Tungstate Aqueous Solutions Containing Chloride** J. Braz. Chem. Soc., Vol. 14, No. 4, 570-576, 2003
- CALLISTER Jr., W.D., **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**, 5ª Ed., LTC, Brasil, 2002.
- CHIAVERINI, V., **Aços e Ferros Fundidos: Características Gerais, Tratamentos Térmicos, principais tipos**, 7ª Ed., Associação Brasileira de Materiais, São Paulo, 2008.
- DIAS. F. M. S.; CÂNDIDO, L. C. **Efeito da acidez na estabilidade da Camada passiva de aços inoxidáveis em Soluções contendo íons cloretos.** Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, vol.4, n.4. 43-46. 2008
- DÍAZ, B. *et al* **Oxide Film Growth by CSV on AISI 316L: a Combined Electrochemical and Analytical Characterization** J. Braz. Chem. Soc. Vol.24, No. 8, 1246-1258, 2013.
- DOBOSZ, L. M. **Electrochemical Assessment Of Corrosion Behavior Of 316 Stainless Steel In Sodium Chlorate Solutions** Nace international corrosion conference and expo 2012
- GARCÍA, C. *et al* **Effect of ageing heat treatments on the microstructure and intergranular corrosion of powder metallurgy duplex stainless steels** Corrosion Science 52, 3725–3737, 2010
- GIDEON, B; WARD, L.; BIDDLE, G. **Duplex Stainless Steel Welds and their Susceptibility to Intergranular Corrosion** *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 7, No.3, 247-263, 2008
- GENTIL, V. **Corrosão** 5ª ed., LTC, Rio de janeiro, 2007
- GIRÃO, I. F. **Caracterização da resistência a corrosão por pite do aço uns s31803.** 2008. 49p. Centro Universitário da Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros. Orientador: Rodrigo Magnabosco
- GJØNNES, A. W. **Effect of Sulfide Inclusions in Austenitic Stainless Steel on the Initiation of Pitting in Base Metal and Heat Affected Zone after Welding** 2012 Norwegian University of Science and Technology Orientador: Kemal Nisancioglu
- GONG, J. **Evaluation of intergranular corrosion susceptibility of UNS S31803 duplex stainless steel with an optimized double loop electrochemical potentiokinetic reactivation method** Electrochimica Acta 55, 5077–5083, 2010

- HERMAS, A. A. *et al.* **Effects of Alloying Additions on Corrosion and Passivation Behaviors of Type 304 Stainless Steel.** Corrosion vol. 51, No.1 1995.
- HONG, J. **Evaluation of aged duplex stainless steel UNS S32750 susceptibility to intergranular corrosion by optimized double loop electrochemical potentiokinetic reactivation method** Corrosion Science 68, 249–255, 2013
- IBRAHIM, M.A.M; REHIM, El,S.S.A.E, M.M. Hamza **Corrosion behavior of some austenitic stainless steels in chloride environments** Materials Chemistry and Physics 115, 80–85, 2009
- LOPEZ, N. *et al* **Application of double loop electroquemical potenciodynamic reactivation test to austenitic and duplex stainless steels.** Materials Science and Engeneering A229, 123-128, 1997
- LOTO, C.A. *et al* **Corrosion Polarization Behaviour of Type 316 Stainless Steel in Strong Acids and Acid Chlorides** Int. J. Electrochem. Sci., 7 2012 3787 - 3797
- LUZ, T. S.; FARIAS, J. P.; FERRARESI, V. A **Análise Microestrutural e Tenacidade ao Impacto da ZAC do Aço inoxidável Ferrítico com 11%Cr (Microstructural Analysis and Impact Toughness of HAZ of Ferritic Stainless Steel with 11%Cr)** Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 18, No. 03. 2013 p.198-206.
- MARTINS, M. **Caracterização microestrutural-mecânica e resistência à corrosão do aço inoxidável super duplex ASTM A890 / A890 Grau 6A** Universidade de São Paulo. Orientador: Luiz Carlos Casteletti
- MORONA, M. T. **Ensaios eletroquímicos e influência da nitretação à plasma na resistência à corrosão do aço inoxidável iso 5832-1** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Orientador: João Batista Floriano
- MURI, P. *et al* **Experimental Procedures and Sensitization Diagnostics of AISI 304 Steel by Double Loop Electrochemical Potentiodynamic Reactivation Method** Electrochimica Acta 124, 183–189, 2014
- NUNES, L.P. **Fundamento de Resistencia à Corrosão,** Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2007
- RAMANA, K. V. S. *et al.* **Effect of different environmental parameters on pitting behavior of AISI type 316L stainless steel: Experimental studies and neural network modeling.** Materials and Design 30. 2009. 3770–3775
- RASHID, M. W. A. **Formation of Cr23C6 during the Sensitization of AISI 304 Stainless Steel and its Effect to Pitting Corrosion.** Int. J. Eletctrochem. Sci., 7. 2012. 9465 – 9477

- RITONI, M; MARTINS, M; MEI, P. R. **Efeito do tratamento térmico na estrutura e nas propriedades mecânicas de um aço inoxidável superaustenítico.** 2007 R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(1): 155-161
- ROCHA JUNIOR, C. J. **Ensaios de corrosão intergranular em aços inoxidáveis austeníticos após sensibilização, de acordo com as práticas A e E segundo astm a262.** 2011. 19º Congresso de Iniciação Científica
- SANCHES, L. P. **Estudo comparativo quanto a resistência à corrosão entre aços inoxidáveis utilizados em trocadores de calor.** 2009. 75p. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Orientador: José A. C. Ponciano Gomes
- SENATORE, M.; FINZETTO, L.; PEREA, E. **Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L.** 2007. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(1): 175-181
- SHERINE, H. B.; RAJAKUMARI, C.C.; RAJENDRAN, S. **Corrosion Behaviour of Stainless Steel 304 Electroplated with Zinc Followed by Blue Passivation** Portugaliae Electrochimica Acta 2011, 29(4), 295-305
- SILVA, F. G.; LIBORIO, J. B. L. **A Study of Steel Bar Reinforcement Corrosion in Concretes with SF and SRH Using Electrochemical Impedance Spectroscopy** Materials Research, Vol. 9, No. 2, 209-215, 2006
- SILVA, A.L.V.C.; MEI, P.R., **Aços e Ligas Especiais,** 3ª ed., Blucher, São Paulo, 2013.
- SOKEI, C. R. *et al.* **Análise das partículas de segunda fase No aço inoxidável austenítico de Alto nitrogênio iso 5832-9** VII Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável, 2004, São Paulo-SP.
- SOUZA, M. E. P. **Comparative behaviour in terms of wear and corrosion resistance of galvanized and zinc-iron coated steels** Revista Matéria, v. 12, n. 4, pp. 618 – 623, 2007
- STROBEL FILHO, E.; LIMA, A. P.; MARIANO. N. A. **Efeito do tratamento térmico na caracterização microestrutural e das propriedades mecânicas de um aço inoxidável martensítico do tipo 13Cr5Ni0,02C.** R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(1). 123-127. 2007
- TAVARES, S. S. M. *et al* **Characterization of microstructure, chemical composition, corrosion resistance and toughness of a multipass weld joint of superduplex stainless steel UNS S32750** Materials Characterization 58, 2007 610–616
- WIKA, S. F. **Pitting and Crevice Corrosion of Stainless Steel under Offshore ConditionsPitting and Crevice Corrosion of Stainless Steel under Offshore**

Conditions. Norwegian University of Science and Technology. 2012. 75p. Orientador: Kemal Nisancioglu.

- WOLYNEC, S. **Técnicas Eletroquimicas em Corrosão,** edusp, São Paulo , 2003.

7. TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros sugere-se os seguintes experimentos:

- Realização de ensaios de amperometria (corrente x tempo) e de DL-EPR nas amostras termicamente tratadas, a fim de conhecer uma melhor relação entre a microestrutura dos aços e a susceptibilidade à corrosão frente aos diferentes parâmetros do meio oxidante.
- Obtenção de ensaios eletroquímicos complementares em diferentes temperaturas do meio oxidante.
- Obtenção de ensaios eletroquímicos em pH alcalino.
- Realização de observação microestrutural das amostras termicamente tratadas antes e após os testes de corrosão.