



## **INFLUÊNCIA DO MEIO SALINO NA RESISTÊNCIA MECÂNICA E TENACIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO K39MD**

### ***INFLUENCE OF THE SALINE ENVIRONMENT ON THE MECHANICAL RESISTANCE AND TENACITY OF THE FERRITICAL STAINLESS STEEL K39MD***

Gabriel Zangrande de Andrade – gzandrade@outlook.com  
Rosivaldo Pereira das Virgens – rpv2@hotmail.com  
Tecnólogos em Mecânica: processos de soldagem  
Faculdade de Tecnologia (FATEC) – Sertãozinho – SP – Brasil

Prof. Dr. Mauricio Angeloni – mauricio.angeloni@fatec.sp.gov.br  
Prof. Dr. Péricles Bosquetti – pericles.bosquetti@fatec.sp.gov.br  
Faculdade de Tecnologia (FATEC) – Sertãozinho – SP – Brasil

### **RESUMO**

A busca pela eficiência é uma vertente em praticamente todos os setores da economia. Não é diferente para o setor industrial, cada dia mais competitivo e tecnológico, a procura constante por novos produtos e por novas formas de se produzir ganha cada vez mais espaço desde o chão de fábrica até a alta diretoria das empresas. A relação custo por benefício é um fator fundamental para as empresas sobreviverem no mercado globalizado. O aço inoxidável ferrítico K39MD, produzido pela ArcelorMittal, traz novas possibilidades e promessas de durabilidade aos componentes e peças com ele fabricados. Um estudo detalhado deste aço, levando-se em consideração as reais solicitações a que estará submetido, torna-se imperativo para uma aplicação segura e confiável do produto. Este trabalho teve por objetivo o estudo do aço inoxidável ferrítico K39MD quanto as intempéries do meio. Após a realização de ensaios de Salt Spray, as amostras foram ensaiadas para a verificação da influência do meio salino nas propriedades mecânicas do aço em estudo, que se mostrou altamente resistente a degradação em função dos tempos de exposição.

**Palavras-chave:** Aço inoxidável ferrítico. Meio Salino. Corrosão. Propriedades mecânicas

### **ABSTRACT**

The quest for efficiency is a watershed in virtually every sector of the economy. It is no different for the industrial sector, every day more competitive and technological, the constant search for new products and new ways of producing gains more and more space from the factory floor to the top management of the companies. The cost-per-benefit ratio is a key factor for companies to survive in the globalized market. The ferritic stainless steel K39MD, produced by ArcelorMittal, brings new possibilities and promises of durability to the components and parts made with it. A detailed study of this steel, taking into account the actual requests to which it will be submitted, becomes imperative for a safe and reliable



application of the product. The objective of this work was the study of the ferritic stainless steel K39MD in relation to the weather in the middle. After salt spray tests, the samples were tested for the influence of the saline medium on the mechanical properties of the steel under study, which was highly resistant to degradation as a function of the exposure times.

**Keywords:** Ferritic stainless steel. Saline environment. Corrosion. Mechanical properties.

**DOI:**

## 1 INTRODUÇÃO

As empresas buscam, de um modo geral, desenvolver alternativas de melhor relação custo/benefício para seus produtos e processos. Grande parte das indústrias, independente da área de atuação, está operando a mais de vinte anos e seus componentes críticos têm ultrapassado o tempo de vida útil calculado em projeto. Algumas razões econômicas e justificativas técnicas contribuíram na decisão de prolongar o tempo de serviço destas unidades por períodos superiores ao tempo de vida previsto em projeto (VISWANATHAN, 1993; REIS SOBRINHO, 2004).

Nestas indústrias, uma gama de componentes é fabricada com aços inoxidáveis ferríticos. Após vários anos de serviço, e como resultado de complexas condições de trabalho, esses materiais sofrem deterioração metalúrgica e/ou mecânica (BAGNOLI et al., 1988). Frequentemente a deterioração pode implicar na substituição parcial ou total, até a falha abrupta de um componente. Visto que a interrupção da operação de uma unidade fabril, sem que esta tenha realmente esgotada sua vida útil, não é economicamente atrativa; e considerando as dificuldades em seguir as exigências dos órgãos governamentais quanto ao serviço após uma falha, parte-se para a avaliação da vida residual ou de reparos por solda. Nestes casos, o objetivo fundamental é o de aumentar o período de trabalho com segurança, mantendo os níveis das exigências estabelecidas nos códigos dos projetos, fabricação e manutenção (KAUTZ; ZURN 1993; GODFREY, 1993).

O fenômeno ligado à deterioração mecânica e metalúrgica tem sido amplamente estudado, tanto em materiais expostos diretamente ao serviço como através de ensaios que simulam condições reais de operação (SHIGA et al., 1996; REIS SOBRINHO, 2004).



Outro fato relevante, como por exemplo na indústria de petróleo e gás natural, é que dentre todas as falhas estruturais observadas, cerca de um quarto são atribuídas a problemas relacionados à corrosão (BATPISTA et al., 2000). A tendência é que esta situação se agrave ainda mais no Brasil, devido, sobretudo ao processamento crescente de petróleos pesados e extrapesados (BATPISTA; CORRÊA, 1997; GARCIA et al., 2001; GLESSON, 2004).

Os aços inoxidáveis ferríticos, de um modo geral, apresentam boas propriedades mecânicas, ocupando uma posição intermediária neste aspecto, quando comparados com outras famílias de aços inoxidáveis. Eles apresentam uma maior tensão de escoamento que os austeníticos, enquanto suas propriedades de alongamento e conformação são equivalentes às do aço carbono. Suas propriedades físicas incluem duas características nas quais eles se comportam melhor do que os austeníticos: expansão térmica e condutividade térmica. Sua condutividade térmica, por exemplo, é notadamente alta. Isto significa que eles difundem o calor de forma comparativamente mais eficaz, o que os torna altamente adequados para aplicações como trocadores de calor (tubulares ou placas). O coeficiente de expansão térmica dos aços inoxidáveis ferríticos é similar ao do aço carbono e muito mais baixo que o do aço inoxidável austenítico. Conseqüentemente, os ferríticos se distorcem menos quando aquecidos (GONÇALVES, 2001).

O aço inoxidável ferrítico K39MD, produzido pela ArcelorMittal, é bastante utilizado nos seguimentos da indústria automobilística, petroquímica, construção civil e arquitetura, sucroalcooleira (sistemas de exaustão), eletrodoméstico (máquinas de lavar roupas, fogões, fornos de micro-ondas) e estampagem em geral, podendo ser comparado aos aços inoxidáveis AISI 430 e 439, com a vantagem de possuir boa soldabilidade, estampabilidade e baixa quantidade de Ni, tornando-o bastante competitivo no mercado, especialmente onde é exigida resistência à corrosão e redução de espessura, quando comparado ao aço carbono. Adicionalmente, a presença de Ti e Nb aumentam a resistência à corrosão deste aço inoxidável (APERAM, 2018).

Para um uso mais confiável e seguro deste aço em aplicações estruturais, principalmente no seguimento automobilístico e petroquímico, deve-se conhecer suas propriedades tais como a resistência mecânica, tenacidade, etc. Adicionalmente, visto que a principal vantagem desta classe de materiais é sua elevada resistência à corrosão, é de extrema importância saber como eles se comportam sob carregamentos mecânicos e corrosão



simultaneamente. Ensaio realizados em ambiente salino visam uma simulação de como os componentes se comportariam em cidades nas quais existe o fenômeno da maresia, tornando o fator corrosivo bastante presente.

Neste estudo utilizou-se o ensaio de tração convencional, realizado em corpos de prova condicionados, isto é, submetidos a tempos variados de exposição ao ambiente de névoa salina, para se avaliar a influência da direção de laminação e dos tempos de exposição nas propriedades mecânicas de resistência e tenacidade do aço inoxidável ferrítico K39MD.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A expressão “aço inoxidável”, como é usualmente conhecida, nos dá uma ideia de um material “indestrutível”, mesmo quando submetido as mais severas condições de operação. Na verdade, este tipo de aço não é “eterno”, mas apresenta, geralmente, uma maior resistência à corrosão quando submetido a um determinado meio ou agente agressivo, quando comparado com aços comuns, por exemplo. Apresenta também uma maior resistência à oxidação a altas temperaturas, em relação a outras classes de aços, quando, neste caso em particular, recebe a denominação de aço refratário. (PADILHA, 1989)

A resistência à oxidação e corrosão do aço inoxidável se deve principalmente a presença do cromo, que a partir de um determinado valor e em contato com o oxigênio, permite a formação de uma película finíssima de óxido de cromo sobre a superfície do aço, que é impermeável e insolúvel nos meios corrosivos usuais.

Assim podemos definir como aço inoxidável o grupo de ligas ferrosas Ferro – Cromo (Fe – Cr) resistentes à oxidação e corrosão, que contenham no mínimo 12% do elemento cromo. Esse elemento é considerado o mais importante nos aços inoxidáveis, pois eleva a resistência à corrosão (DENNY, 1996).

Os aços inoxidáveis são bastante utilizados em transporte, indústria de alimentos e bebidas, automobilística, química, petroquímica, de fertilizantes, médica-odontológica, farmacêutica, de artigos de cozinha, etc. Além de possuírem as propriedades mecânicas, físicas e metalúrgicas necessárias a este número variado de aplicações, oferecem vantagens adicionais na área da metalurgia. (DIAS, 2002).



Quando os aços inoxidáveis são comparados com alguns metais ou ligas, observam-se diferenças importantes: os metais que constituem os aços inoxidáveis reagem com bastante facilidade. Em particular o Cr, que possibilita a formação de filmes que protegem os aços de ataques corrosivos. Este fenômeno, no qual a liga ou o metal deixa de ser corroída, chama-se de passivação (GONÇALVES, 2001).

Os filmes passivos são extremamente finos, da ordem de 0,3 a 0,5 nm de espessura. A primeira experiência de passivação, realizada aproximadamente há 160 anos, foi feita com aço carbono em meios nítricos. Nessa época não se conhecia o aço inoxidável. Até poucos anos atrás, predominou a ideia de que os filmes nos aços inoxidáveis eram formados por óxidos dos metais ou óxidos hidratados. Esse filme era constituído principalmente de óxido ou óxido hidratado de cromo (DANIEL; WARNIER, 1999; SEDRIKS, 1979).

Aparentemente, nos aços inoxidáveis, o filme passivo forma-se pela reação entre água e o metal de base, constituído assim por um filme de oxihidróxido dos metais Fe e Cr. Os filmes formados em meios oxidantes, como é o caso do ácido nítrico usado em banhos de decapagem, são os mais resistentes.

A adição de outros elementos permite formar um extenso conjunto de materiais. Nos aços inoxidáveis, os dois elementos que mais se destacam são o Cromo (Cr), com um importante papel na resistência a corrosão, e o Níquel (Ni) que contribui na melhoria das propriedades mecânicas. A adição destes e outros elementos como molibdênio (Mo), silício (Si), titânio (Ti), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S) também contribuem em outras propriedades (REICK, 1992).

Segundo Sedriks (1996), os elementos são adicionados às ligas com propósitos específicos, tais como:

- O Cr é o principal responsável pela resistência à corrosão destes aços. A formação de uma fina camada de óxido de cromo em sua superfície confere a estes materiais uma elevada resistência a vários tipos de corrosão. Contudo, alta concentração de cromo pode afetar adversamente as propriedades mecânicas, a soldabilidade e a vida útil em aplicações envolvendo exposição térmica. O cromo é um estabilizador da ferrita e melhora a resistência à corrosão por pite, mas promove a fragilização a 475°C, aumenta a cinética de precipitação e a fração volumétrica de fase  $\sigma$ .



- O Mo é um elemento estabilizador da ferrita que aumenta a tendência de fragilização a 475°C. Apresenta efeito benéfico nas propriedades mecânicas e de corrosão, mas afeta a microestrutura do material, tornando o aço susceptível à precipitação de fases intermetálicas, tais como fase de Laves ( $\text{Fe}_2\text{Mo}$ ), fase chi ( $\gamma$ ) e fase sigma ( $\sigma$ ), aumentando a cinética de precipitação e fração volumétrica de fase  $\sigma$ .

- O Nitrogênio (N) reforça a matriz ferrítica e a austenítica, através do mecanismo de endurecimento por solução sólida intersticial, além de estabilizar a austenita em altas temperaturas. O nitrogênio diminui a proporção dos elementos cromo, níquel e molibdênio na ferrita, o que retarda a precipitação da fase  $\sigma$ . O nitrogênio aumenta a elasticidade, a resistência à tração e a ductilidade, bem como o potencial de corrosão por pite. O nitrogênio aumenta a temperatura na qual a austenita começa a se formar a partir da ferrita, portanto, mesmo com taxas de resfriamento relativamente rápidas, o equilíbrio das frações volumétricas de ferrita e austenita pode ser atingido.

- O Ni é um estabilizador da austenita. Com o aumento da concentração de níquel, a cinética de precipitação de fase sigma é acelerada, uma vez que há diminuição da fração volumétrica de ferrita delta na microestrutura antes do tratamento térmico de envelhecimento. Sua adição provoca também uma mudança na estrutura do material que apresenta melhores características de: ductilidade (estampagem); resistência mecânica a quente; soldabilidade (fabricação)

- O Mn estabiliza a austenita e aumenta a solubilidade do N, substitui o Ni com uma boa relação custo-benefício. Acelera as precipitações de fase  $\sigma$ .

- O tungstênio (W) retarda a formação da fase  $\sigma$ .

- O nióbio reduz a atividade do carbono e nitrogênio (elemento "estabilizador"). Ao reagir com o carbono ajuda a prevenir a formação de carbonetos de cromo, via precipitação em forma de carbonetos durante aquecimento e/ou resfriamento lento em torno de 700 °C, que causam o empobrecimento da Cr na matriz ferrítica, desse modo o filme óxido formado é mais homogêneo.

- O Ti, assim como o nióbio, reduz a atividade do carbono e nitrogênio (elemento "estabilizador"). Ao reagir com o carbono ajuda a prevenir a formação de carbonetos de cromo, via precipitação em forma de carbonetos durante aquecimento e/ou



resfriamento lento em torno de 700 °C, que causam o empobrecimento da Cr na matriz ferrítica, desse modo o filme óxido formado é mais homogêneo.

- O Si é adicionado para aumentar a resistência à oxidação e à corrosão em meios contendo ácido sulfúrico. Usualmente são adicionados em aços inoxidáveis austeníticos. O silício melhora a resistência à oxidação em alta temperatura. É um forte estabilizador da fase ferrítica e essencial como desoxidante durante o refino do aço. Porém, para evitar a formação de ferrita- $\delta$  na microestrutura do aço em temperaturas elevadas, a concentração de silício geralmente não pode exceder 0,7% em peso.

- O cobre (Cu) é adicionado como elemento de liga dos aços inoxidáveis, com o objetivo de elevar as características mecânicas através do endurecimento por precipitação, com tratamentos térmicos de envelhecimentos realizados em baixas temperaturas (próximo de 500°C), sem perdas na resistência à corrosão.

- O alumínio (Al), assim como o Silício, melhora a resistência à oxidação em alta temperatura

- Existem ainda outros elementos que modificam e melhoram as características básicas dos aços inoxidáveis, como o cobalto, o boro e as terras raras, porém são muito específicos.

A adição dos elementos de liga é limitada por faixas, dentro dos níveis necessários para garantia de propriedades específicas e requeridas. A combinação dos elementos de liga resulta na obtenção da resistência à corrosão e propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis (DAVIES, 1993).

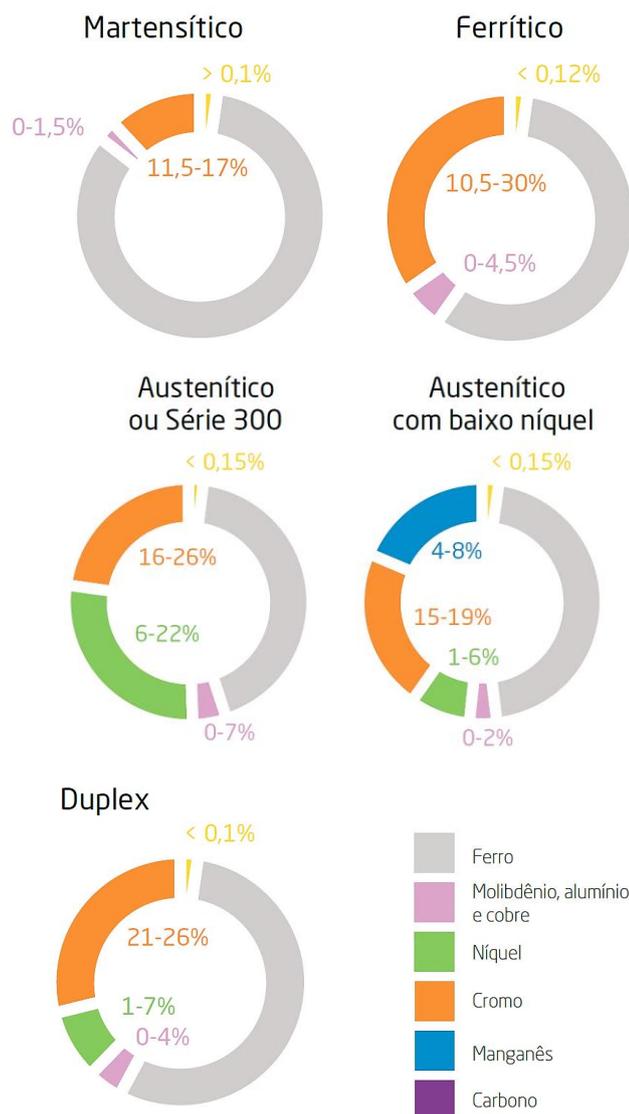
Produtos fabricados com aços inoxidáveis possuem várias características em comum, sendo as principais: inércia química, elevada resistência à corrosão, durabilidade, boa soldabilidade, etc. De acordo com a fase presente majoritariamente em sua microestrutura, estes aços podem ser classificados como martensítico, ferrítico, austenítico e duplex. A Figura 1 apresenta um comparativo simplificado da composição química de cada tipo de aço inox.

Em teoria, os aços inoxidáveis ferríticos são estruturalmente simples, pois apresentam estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) em todas as temperaturas, e na temperatura ambiente, consistem em uma solução sólida de ferro e cromo. A liga contém muito pouco carbono dissolvido, sendo que a maioria do carbono presente aparece na forma



de precipitados finos de carbonetos de cromo, sendo essencialmente ferrítica até o ponto de fusão (CALLISTER JUNIOR, 2008).

**Figura 1 - Composição química simplificada dos diversos tipos de aços inoxidáveis.**



**Fonte: Adaptado de APERAM (2018).**

Classicamente são definidos como ferríticos os aços inoxidáveis, cuja composição química situa-se a direita do campo austenítico no diagrama Fe-Cr, mais exatamente esta análise deve ser feita sobre o diagrama ternário Fe-Cr-C, devido ao forte efeito estabilizador da austenita pelo carbono. Sua estrutura consiste, essencialmente, de ferrita em todas as temperaturas, até a  $T_{liquidus}$ . (CALLISTER JUNIOR, 2008).



Do ponto de vista de aplicações, as ligas ferríticas apresentam boa competitividade pelo seu baixo custo devido à ausência ou pouca adição de níquel, comportando-se melhor que os austeníticos quanto à expansão térmica e condutividade térmica. Quando com altos teores de cromo e molibdênio, têm excepcional resistência à corrosão localizada em meios contendo cloreto, onde alguns aços inoxidáveis austeníticos podem falhar, em especial devido a trincas de corrosão sobtensão. Como características gerais, os ferríticos são ferromagnéticos, possuem limite de escoamento relativamente alto e baixa ductilidade (CALLISTER JUNIOR, 2008).

A precipitação de carbonetos de cromo pode ser muito nociva também para a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis. Para evitar esta precipitação, adições de elementos formadores de carbonetos mais estáveis, como o titânio e o nióbio, podem ser empregadas (GENTIL, 2014).

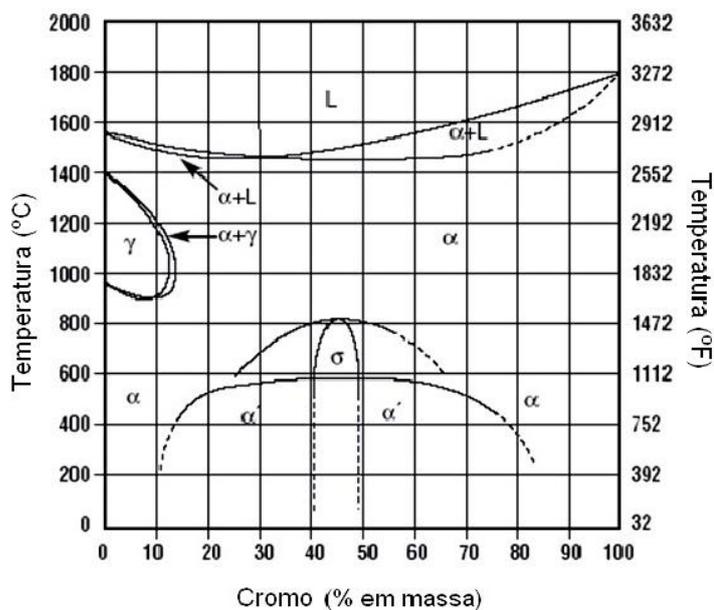
A aplicação dos aços inoxidáveis ferríticos à alta temperatura é limitada a atmosferas oxidantes e é vantajosa quando é necessária resistência à absorção de carbono e/ou enxofre. Sua resistência à oxidação em alta temperatura é comparável à dos aços austeníticos e, por terem menores teores de elementos de liga, têm custos mais baixos.

Estes aços têm temperaturas de transição elevadas (frequentemente acima da temperatura ambiente), não sendo indicados para trabalhos em temperaturas baixas. Além disso, a tenacidade dos inoxidáveis ferríticos pode ser ainda mais comprometida pelo aquecimento prolongado a temperaturas na faixa de 400 a 500°C. O fenômeno é mais grave por volta de 475°C (conhecido como fragilização de 475°C) e é causado pela precipitação de uma fase rica em Cr  $\alpha'$  (Figura 2).

Em geral, um meio agressivo diminui a resistência mecânica de um componente, sendo que ele afeta a probabilidade de coalescimento de vazios e nucleação de trincas, levando a uma fratura frágil e de forma prematura, quando comparada à fratura em ar. O principal fator para tal diminuição é a formação de pites que agem como concentradores de tensão por efeito de entalhe mecânico. Defeitos mecanicamente induzidos como microtrincas, lacunas, ranhuras e intrusões/extrusões geram locais propícios à iniciação de corrosão por pitting. (DU et al., 1998)



Figura 2 - Diagrama de fases Fe-Cr mostrando a estabilidade da fase  $\sigma$  e  $\alpha'$  para uma ampla faixa de Cromo.



Fonte: Vander Voort, Lucas e Manivola (2004).

Como a corrosão é um processo físico-químico, que implica na modificação das propriedades dos materiais de engenharia, que pode ocorrer com ou sem perda de massa, é extremamente importante o estudo deste fenômeno associado a carregamentos mecânicos para a real compreensão da influência do ambiente no comportamento dos materiais e em especial do aço inoxidável ferrítico K29MD, objeto deste estudo.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os materiais e métodos utilizados são descritos nas subseções 3.1.e 3.2.

#### 3.1 Material

O material utilizado neste estudo é o aço inoxidável ferrítico K39MD, recebido na condição de “laminado a frio”, ou seja, com direção preferencial de orientação dos grãos, de modo que os corpos de prova foram retirados no sentido longitudinal e transversal da chapa laminada e cuja composição química nominal é apresentada na Tabela 1.



**Tabela 1 - Composição química nominal do aço inoxidável K39MD produzido pela ArcelorMittal.**

Aço	Elementos [% em peso]									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N <sub>2</sub>	Outros
K39MD	0,03 máx	1,00 máx	1,00 máx	0,040 máx	0,030 máx	17,0 - 19,0	0,50 máx	-	0,03 máx	0,20 + 4(C+N <sub>2</sub> ) ≤ Ti+Nb ≤ 0,75

Fonte: Adaptado de Arcelormittal (2018).

### 3.2 Método

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com as normas:

- ASTM E8 / E8M - 11
- ASTM A370 - 12

Para a determinação das propriedades mecânicas de Alongamento (A%), Redução de Área (RA%), Tensão Limite de Escoamento ( $\sigma_{e0,2\%}$ ) e Tensão Limite de Resistência ( $\sigma_r$ ).

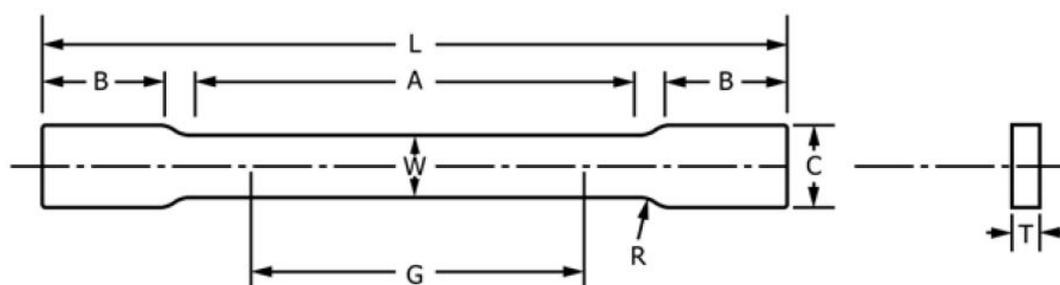
Os corpos de prova foram confeccionados por eletro erosão a fio a partir de toda a extensão de área das chapas fornecidas, Figura 3, na direção longitudinal e transversal do sentido de laminação.

O condicionamento dos corpos de prova em ambiente de névoa salina foi realizado por meio do ensaio de Salt Spray, de acordo com norma ASTM B 117-07<sup>a</sup>.

Os corpos de prova foram marcados, pesados e posteriormente colocados no equipamento de Salt Spray para realização do ensaio. Foram colocados 3 corpos de prova longitudinais e 3 corpos de prova transversais para 300, 500 e 1000 horas de corrosão. Após o término do tempo de cada ensaio, as amostras foram pesadas novamente, para verificação da perda de massa e por fim foram realizados os ensaios de tração em cada corpo de prova.



**Figura 3 - Corpos de prova usinados, de acordo com norma ASTM E8/E8M-11, no formato de chapa, retirados de toda a extensão em área das chapas fornecidas.**



- G - Comprimento útil
- T - Espessura
- W - Largura da região útil
- R - Raio do filete
- B - Comprimento da extensão de garra
- L - Comprimento total
- A - Comprimento da secção reduzida
- C - Largura da região de garra

**Fonte: os autores**

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

As subseções 4.1 e 4.2 apresentam, respectivamente os resultados do ensaio salt-spray e do ensaio de tração.



#### 4.1 Ensaio Salt-Spray

A Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam os resultados da pesagem dos corpos de prova, para o estado inicial e final, isto é, antes e após a exposição ao ambiente de névoa salina.

**Tabela 2 - Pesagem corpos de prova, sentido de corte longitudinal.**

Corpo de Prova	Horas em Névoa Salina	Peso Inicial	Peso Final	Variação	Média	Desvio
		(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
1 L	0	-	-	-		
2 L		-	-	-	-	-
3 L		-	-	-		
4 L	300	33,1592	33,1590	-0,0002		
5 L		33,2070	33,2037	-0,0033	-0,0015	0,0016
6 L		33,1539	33,1529	-0,0010		
7 L	500	32,6715	32,6697	-0,0018		
8 L		32,4689	32,4663	-0,0026	-0,0022	0,0004
9 L		33,1740	33,1718	-0,0022		
10 L	1000	32,5510	32,5502	-0,0008		
11 L		33,2051	33,2051	0,0000	0,0001	0,0010
12 L		32,6975	32,6986	0,0011		

Fonte: elaborada pelos autores

**Tabela 3 - Pesagem corpos de prova, sentido de corte transversal.**

Corpo de Prova	Horas em Névoa Salina	Peso Inicial	Peso Final	Variação	Média	Desvio
		(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
1 T	0	-	-	-		
2 T		-	-	-	-	-
3 T		-	-	-		
4 T	300	32,4503	32,4471	-0,0032		
5 T		32,5994	32,9575	0,3581	0,1165	0,2092
6 T		32,5455	32,5402	-0,0053		
7 T	500	32,9442	32,9424	-0,0018		
8 T		32,8992	32,9872	0,0880	0,0277	0,0522
9 T		32,852	32,849	-0,0030		
10 T	1000	33,0933	33,0934	0,0001		
11 T		33,0883	33,089	0,0007	-0,0661	0,1152
12 T		32,5846	32,3854	-0,1992		

Fonte: elaborada pelos autores



Um acréscimo no peso de alguns dos corpos de prova, para tempos de 300 a 500 horas é resultado da criação de uma camada passiva, que é a responsável pela notável resistência a corrosão do aço inoxidável.

Já para tempos de 1000 horas o fenômeno de perda de massa esteve presente, indicando a perda da camada passiva protetiva do material.

Para os corpos de prova retirados no sentido longitudinal ocorreu a criação de uma camada muito mais “fina”, explicitado pelo baixo ganho de massa, quando comparado com os corpos de prova retirados no sentido transversal ao de laminação, devido ao número/quantidade de contornos de grão serem bem maiores neste último caso, permitindo assim uma maior interação do material com o ambiente, que ocorre preferencialmente nas regiões mais vulneráveis, isto é, nos contornos de grão.

#### 4.2 Ensaio de Tração

Após a realização do ensaio de Salt Spray, os corpos de prova condicionados foram submetidos ao ensaio de tração para a determinação das propriedades de resistência e tenacidade. Os resultados referentes ao alongamento são apresentados na Tabelas 4 e na Tabela 5.

**Tabela 4 - Alongamento dos corpos de prova com sentido de corte transversal.**

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Horas em Névoa Salina</b>	<b>L<sub>0</sub></b>	<b>L<sub>f</sub></b>	<b>A [%]</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio</b>
1 T	0	50	70,99	41,97	39,39	2,58
2 T		50	69,69	39,38		
3 T		50	68,41	36,82		
4 T	300	50	71,10	42,21	40,08	2,42
5 T		50	70,29	40,58		
6 T		50	68,72	37,4		
7 T	500	50	71,46	42,92	42,51	0,95
8 T		50	70,71	41,42		
9 T		50	71,59	43,18		
10 T	1000	50	72,16	44,32	42,07	2,17
11 T		50	70,95	41,9		
12 T		50	69,99	39,98		

**Fonte: elaborada pelos autores**



Tabela 5 - Alongamento dos corpos de prova com sentido de corte longitudinal.

Corpo de Prova	Horas em Névoa Salina	L0	Lf	A [%]	Média	Desvio
1 L	0	50	73,16	46,33	42,99	2,90
2 L		50	70,55	41,10		
3 L		50	70,77	41,54		
4 L	300	50	72,98	45,97	42,88	2,89
5 L		50	70,12	40,25		
6 L		50	71,20	42,41		
7 L	500	50	71,08	42,16	43,18	1,36
8 L		50	71,34	42,67		
9 L		50	72,36	44,72		
10 L	1000	50	69,22	38,45	37,73	0,82
11 L		50	68,95	37,91		
12 L		50	68,42	36,84		

Fonte: elaborada pelos autores

Como pode ser observado, os dados encontram-se praticamente todos dentro de um mesmo desvio padrão, ou seja, não existe alteração no alongamento em função dos variados tempos de exposição ao ambiente salino, isto é, o aço não sofreu degradação, mostrando que o mesmo possui uma excelente resistência a corrosão.

Os resultados referentes a tensão limite de escoamento estão apresentados, na Tabela 6 e na Tabela .

Tabela 6 - Tensão limite de escoamento para o sentido transversal.

Corpo de Prova	Horas em Névoa Salina	$\sigma_{\text{esc-0,2\%}}$ [MPa]	Média $\sigma_{\text{esc-0,2\%}}$	Desvio $\sigma_{\text{esc-0,2\%}}$
1 T	0	285	282	20
2 T		261		
3 T		301		
4 T	300	250	272	19
5 T		287		
6 T		279		
7 T	500	297	276	24
8 T		281		
9 T		250		
10 T	1000	292	297	5
11 T		301		
12 T		298		

Fonte: elaborada pelos autores



**Tabela 7 - Tensão limite de escoamento para o sentido longitudinal.**

Corpo de Prova	Horas em Névoa Salina	$\sigma_{esc-0,2\%}$ [MPa]	Média $\sigma_{esc-0,2\%}$	Desvio $\sigma_{esc-0,2\%}$
1 L		249		
2 L	0	241	257	21
3 L		281		
4 L		244		
5 L	300	249	245	3
6 L		243		
7 L		251		
8 L	500	257	251	7
9 L		244		
10 L		253		
11 L	1000	244	263	25
12 L		291		

Fonte: elaborada pelos autores

Os dados apresentados nas tabelas 6 e 7, apresentam a influência dos tempos de exposição ao ambiente corrosivo e do sentido de laminação na região de escoamento do material, isto é, região na qual o comportamento passa de elástico para plástico. Como pode ser observado, de modo semelhante para o alongamento, os valores de limite de escoamento obtidos encontram-se dentro de um mesmo desvio padrão, ou seja, praticamente não existe alteração nesta propriedade em função dos tempos de exposição ao ambiente salino.

Os resultados referentes a tensão limite de resistência a tração são apresentados na Tabela 8 e na Tabela 9.

**Tabela 8 - Tensão limite de resistência para o sentido transversal.**

Corpo de Prova	Horas em Névoa Salina	$\sigma_{res}$ [MPa]	Média $\sigma_{res}$	Desvio $\sigma_{res}$
1 T		408		
2 T	0	407	408	1
3 T		408		
4 T		408		
5 T	300	409	406	4
6 T		402		
7 T		408		
8 T	500	408	408	0
9 T		408		
10 T		407		
11 T	1000	409	409	2
12 T		410		

Fonte: elaborada pelos autores



**Tabela 9 - Tensão limite de resistência para o sentido longitudinal**

Corpo de Prova	Horas em Névoa Salina	$\sigma_{res}$ [MPa]	Média $\sigma_{res}$	Desvio $\sigma_{res}$
1 L		409		
2 L	0	409	409	0
3 L		409		
4 L		407		
5 L	300	414	410	4
6 L		409		
7 L		404		
8 L	500	407	406	2
9 L		407		
10 L		415		
11 L	1000	411	411	4
12 L		407		

Fonte: elaborada pelos autores

Os dados apresentados nas tabelas 8 e 9 ilustram a influência dos tempos de exposição ao ambiente corrosivo e do sentido de laminação no limite de resistência do material. De forma análoga as propriedades apresentadas anteriormente e corroborando com os demais resultados apresentados anteriormente, praticamente não existe alteração no limite de resistência a tração do material em função dos tempos de exposição ao ambiente salino e em relação a direção de retirada dos corpos de prova, mostrando que o aço inoxidável ferrítico K39MD não sofreu degradação ao longo do tempo, mantendo assim suas propriedades praticamente inalteradas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados encontrados, para os ensaios de Salt Spray e de tração realizados, e com o embasamento teórico levantado pode-se concluir que, apesar de o material deste estudo, o aço inoxidável ferrítico K39MD produzido pela ArcelorMittal, ter sido exposto a um nível severo de solitação, quanto ao ambiente, o mesmo se mostrou muito resistente a corrosão e cujo comportamento mecânico permaneceu praticamente constante em função dos variados tempos de exposição ao meio salino, isto é, não sofreu degradação e conseqüentemente não teve suas propriedades alteradas em ambas as direções de retirada dos corpos de prova, longitudinal e transversal a direção de laminação. Podendo assim ser



utilizado em diversas áreas, desde a fabricação de eletrodomésticos até a industrial naval e petroquímica.

## REFERÊNCIAS

- APERAM. **Aço inoxidável**: a solução perfeita para o desenvolvimento sustentável. 2018. Disponível em: <<http://www.aperam.com/uploads/stainlesseurope/South%20America/catalogo%20Aco%20Inox%20Aperam.pdf>>. Acesso em: 23 de jun. 2018
- ARCELORMITTAL. **Soluções sustentáveis em aço inoxidável para toda a cadeia de óleo e gás**. Disponível em: <[http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/08/Catalogo\\_Oil\\_e\\_Gas.pdf](http://guides.com.br/home/wp-content/uploads/2011/08/Catalogo_Oil_e_Gas.pdf)>. Acesso em: 23 de jun. 2018.
- BAGNOLI, D. L. et al., **Embrittlement of 1Cr-1/2 Mo and 1 ½ Cr – ½ Mo alloys alter long time service. Corrosion 88. Paper nº 160**. Cervantes Convention Center. St. Louis. Missouri. March 21-25, 1988.
- BAPTISTA, W., CORRÊA, L. A., **Monitoração on-line da corrosão em unidades de craqueamento catalítico fluido da Repar**. CENPES, p. 22, 1997.
- BAPTISTA, W., CORRÊA, L. A., VIGO, J., BOEING, E. **Knowledge Based Systems Development and Application in Corrosion Control and Monitoring**. CORROSION/00, (Houston, TX: NACE), paper n. 484, 2000.
- CALLISTER, Jr., William D., **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução; tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. – Rio de Janeiro : LTC, 2008
- DANIEL, A. B. e J. C. WARNER. **Metallurgy Fundamentals**. United States of America. 1999, p. 79-82.
- DAVIES, R. D., **Effects of Vanadium on Polarization of 18%Cr Ferritic Stainless Steel, corrosion – Department of Metallurgy and Materials Engineering University, Witwatwersrand, Johannesburg, South Africa, July, 1993.**
- DENNY, A. J., **Principles and prevention of corrosion**. 2. ed. New Jersey. Prentice Hall, Inc., 1996.
- DIAS, J. C. N. **Estudo da ocorrência da corrosão em aços inoxidáveis AISI 316L e 444 utilizados na indústria petroquímica**. volume único, p. 1-6, 2002.
- DU, M.L. et al, **Damage of Al 2024 alloy due to sequential exposure to fatigue, corrosio and fatigue. International Journal of Fatigue**, Surrey, v.20, n.10, p.743-748, nov., 1998.



- GARCIA, L. A. C.; JOIA, C. J. B. M.; CARDOSO, E. M.; MATTOS, O. R., Electrochemical methods in corrosion on petroleum industry: laboratory and field results. **Electrochemica Acta**, v. 46, p. 3879 – 3886, 2001.
- GENTIL, Vicente, **Corrosão**. 6. ed. [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- GLESSON, B. Alloy Degradation Under Oxidizing – Sulfidizing Conditions at Elevated Temperatures. **Materials Research**, v. 7, p. 61 – 69, 2004.
- GODFREY, P. S., The philosophy of when to repair. **Welding in the World**. v. 32, 1993.
- GONÇALVES, N., Catálogo Acesita, 3. ed. **Características Básicas e Cuidados do Aço Inoxidáveis**, volume único, p. 1-7, 2001.
- KAUTZ, H. R. and ZURN, H. E. D., Thermally damaged power plant components and their repair-task for welding engineering. **Welding in the world**. v. 32, 1993.
- PADILHA, A.F., Algumas observações sobre o descobrimento e o desenvolvimento dos aços inoxidáveis. **1º Seminário Brasileiro Sobre Aços Inoxidáveis**, ABM, São Paulo, p.3-15, 1989.
- REICK, W.; POHL, M. and PADILHA, A.F., O desenvolvimento dos aços inoxidáveis ferríticos-austeníticos com microestrutura duplex. **Metalurgia & Materiais**, vol. 48, PP. 551-563, 1992.
- REIS SOBRINHO, J. F. **Correlação entre os comportamentos de tração a quente e fluência do aço 2,25Cr-1Mo na faixa de temperatura de 500°C a 700°C**. 2004. 212 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- SEDRICKS, A. J., **Corrosion of stainless steels**. 2. ed. A Wiley – Interscience Publication, New York, 1996.
- \_\_\_\_\_, A. J., **Corrosion of stainless steels**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1979.
- SHIGA, C. et al., **Review on state of the art the efficiency of PWHT on properties of steel weld metal**. v. 37, 1996.
- VANDER VOORT, G.F.; LUCAS G.M. E MANILOVA, E.P., Metallography and microstructures of heat-resistant alloys, metallography and microstructures, **ASM Handbook**, **ASM International**, vol. 9, p. 820-859, 2004.
- VISWANATHAN. R., **Damage Mechanisms and Life Assessment of high Temperature Components – ASM International**, Ohio, 2.ed. Edition, 1993.