



CARACTERIZAÇÃO DO AÇO ASTM A-36 COM REVESTIMENTO DE SOLDA DURA E CEMENTAÇÃO PARA USO EM PEÇAS DE DESGASTE ABRASIVO

Jamile Thön Langbehn¹

Anderson Daleffe²

Resumo: O desgaste abrasivo é alvo de muitos estudos, pois é responsável pela redução de vida útil de máquinas e ferramentais na indústria em geral. Peças que possuem desgaste abrasivo superficial aliado a esforços de impacto ou vibração requerem tratamentos térmicos superficiais, mantendo assim seu núcleo tenaz. A cementação é um desses tratamentos, o qual é muito aplicado ao aço SAE 8620. Esse aço possui baixa disponibilidade no mercado brasileiro na forma de chapas, tornando difícil a sua utilização na fabricação de peças de grande porte. Este trabalho teve como objetivo buscar uma opção ao aço SAE 8620 que possuía mesma performance e maior disponibilidade de compra. Para isso foi testado o aço ASTM A-36 com aplicação de solda dura de aço inoxidável e posterior cementação. O aço teste e o material de referência foram caracterizados por meio de ensaios de metalografia, microdureza Vickers e desgaste abrasivo com rolo de borracha. A metalografia mostrou que a cementação do material de solda foi efetiva promovendo grande mudança microestrutural no material. O corpo de prova soldado e cementado apresentou performance superior ao aço SAE 8620 e se mostrou viável para substituição deste.

Palavras-chave: Desgaste abrasivo, cementação, soldagem.

1 INTRODUÇÃO

O estudo dos fenômenos tribológicos é de grande importância na metalurgia. A tribologia estuda a interação entre superfícies, onde podem ocorrer fenômenos como atrito, desgaste e lubrificação. É denominado de desgaste quando a interação entre duas superfícies resulta em perda de material. Dentro dos fenômenos de desgaste, se destacam a abrasão e a adesão.

Os fenômenos de desgaste na indústria reduzem a vida útil de peças metálicas, sendo necessária a troca constante de ferramental. Como consequência, há paradas de produção, redução da produtividade e, por fim, prejuízo. Existem diferentes formas de aumentar a resistência a abrasão de ligas metálicas, seja por meio de tratamentos térmicos, termoquímicos ou aplicação de diferentes

¹ Mestranda em Engenharia Metalúrgica. E-mail: jtlangbehn@hotmail.com

² Prof. Dr. Centro Universitário, UNISATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br



revestimentos. A escolha se dá pelo tipo de peça a ser fabricada e sua devida utilização.

Para fabricação de peças em aço o tratamento termoquímico de cementação é utilizado quando é necessária boa resistência a abrasão na superfície e boa tenacidade no núcleo. Desta forma é possível obter uma peça de alta dureza na superfície, mas que não sofra ruptura em situações de impacto ou vibração, por exemplo. Se trata de uma técnica bem difundida na indústria, onde é possível utilizar ligas mais baratas (com menos teor de liga) e com custo de processo relativamente baixo, comparado a outros processos de endurecimento superficial.

Existem diferentes ligas de aço que podem ser usadas para cementação. São exemplos ligas como o aço SAE 8620 e o aço ASTM A-36, sendo o primeiro o mais utilizado e com melhor desempenho. Todavia, a disponibilidade do aço SAE 8620 na forma de chapas é baixa no Brasil, sendo mais facilmente encontrada na forma de barras e tubos de pequenos diâmetros. Com isso, tem-se dificuldade de utilizar este para fabricação de peças de grande formato. Como opção tem-se a fundição do material, mas nem sempre se torna viável, seja por custo, prazo ou qualidade. Ainda, para peças de grande porte geralmente existem locais que sofrem maior desgaste abrasivo, sendo comum a aplicação de solda dura. Se o aço utilizado para fabricar a peça for um aço comum, as partes sem solda acabam se deteriorando muito rápido, e a aplicação de solda total acaba sendo inviável.

Com o objetivo de encontrar uma forma de substituir o aço SAE 8620 para peças cementadas de grande porte, esta pesquisa caracterizou o aço ASTM A-36 com deposição de uma solda dura e posterior cementação, na expectativa de alcançar uma vida útil semelhante. O aço ASTM-A36 tem grande disponibilidade no mercado, baixo custo e boa soldabilidade, o que pode trazer uma grande vantagem competitiva para a fabricação de peças de grande porte.

Para análise de viabilidade da substituição do aço SAE 8620, foram realizados ensaios de caracterização comparando o material de referência cementado, o aço ASTM A-36 cementado, o aço ASTM A-36 com deposição de solda dura sem tratamento e aço ASTM A-36 com deposição de solda dura e cementado. Os ensaios empregados foram de metalografia, microdureza Vickers, e desgaste por roda de borracha. Os resultados obtidos foram consolidados nesta pesquisa.



2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nas próximas seções serão abordados os aspectos teóricos relativos ao estudo e obtidos por meio de uma revisão da bibliografia. Os conteúdos abordados servirão de base para o desenvolvimento da pesquisa e consolidação dos resultados.

2.1 FERRO E O DIAGRAMA DE FASES

O aço, por definição, é uma liga ferrosa que tem como principal elemento de liga o carbono, com percentual máximo de 2,1%. Os aços que contêm apenas o carbono como elemento de liga e outros elementos que sejam considerados residuais são chamados de aços carbono [1].

O ferro, metal que constituiu a matriz do aço, é um material cristalino que possui diversas fases alotrópicas, ou seja, seus átomos podem se arranjar de diferentes maneiras dependendo das condições em que se encontram. Observando as transformações que ocorrem do ferro líquido até o ferro sólido a temperatura ambiente sabe-se que ocorrem 3 transformações alotrópicas, passando de líquido para Fe- δ a 1538°C, de Fe- δ para Fe- γ a 1394°C e de Fe- γ para Fe- α a 912°C [2].

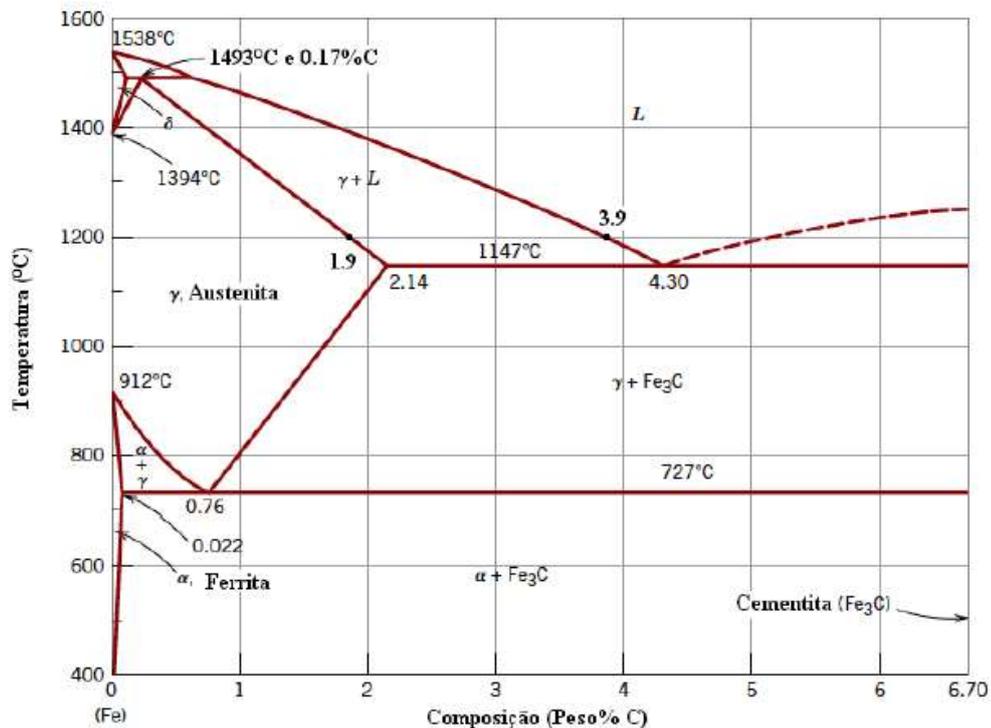
O carbono é um elemento que forma uma solução sólida intersticial no ferro. A austenita (Fe- γ) possui estrutura cúbica de face centrada (CFC) e pode dissolver até 2,1% de C em sua rede cristalina. Por sua vez, a ferrita (Fe- α) na sua estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) forma solução sólida com C contendo no máximo 0,02% deste elemento. Isto se deve ao fato de que os espaços intersticiais da estrutura CFC são maiores em relação a estrutura CCC, admitindo assim um maior teor de carbono [3].

Quando o limite de solubilidade de carbono é atingido ocorre a formação da fase cementita (Fe₃C). Esta fase é dura e frágil e sua presença modifica grandemente as propriedades mecânicas dos aços [1].

Para o estudo dos aços, o diagrama de fases é utilizado até o percentual de máxima solubilidade do carbono na austenita, ou seja, até o percentual de 2,1% de C, o qual está exemplificado na Fig. 1. Analisando esta porção do diagrama, observa-se a formação de um ponto eutetóide com composição de 0,76% C. Uma transformação eutetóide ocorre quando uma fase sólida é totalmente transformada

em outras duas fases sólidas, neste caso ocorre a transformação da austenita para ferrita + cementita, sendo essas dispostas em lamelas. Esta estrutura lamelar é denominada perlita [4].

Figura 1: Diagrama de Fases Ferro-carbono



Fonte: [3]

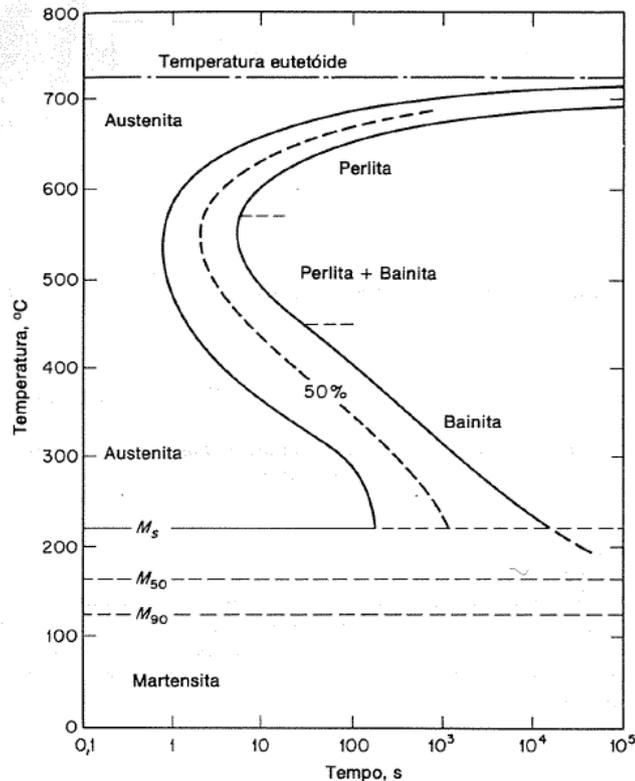
2.2 DIAGRAMA TTT

As transformações de fase observadas nos diagramas de fases em equilíbrio, como indica o nome, só ocorrem em situações de equilíbrio, ou seja, ocorrem de forma lenta disponibilizando energia e tempo necessárias para a formação de cada fase. Porém, nem sempre as transformações ocorrem em situações de equilíbrio, assim como nem sempre as fases estáveis são as desejadas em diferentes aplicações dos materiais [5].

Quando as transformações de fase não ocorrem em situações de equilíbrio é preciso fazer uso de um diagrama Transformação-Tempo-Temperatura conhecido como diagrama TTT. Neste diagrama é possível correlacionar a ação do tempo e temperatura com o tipo de transformação que poderá ocorrer no material. O diagrama

TTT é um diagrama isotérmico [2]. A Fig. 2 mostra o diagrama TTT para um aço eutetóide.

Figura 2: Diagrama TTT de um aço eutetóide



Fonte: [2]

Observando este diagrama é possível identificar a transformação da austenita em outras duas fases que não ocorrem no diagrama de equilíbrio, a bainita e a martensita [3].

A bainita consiste em uma microestrutura formada por ferrita e cementita que se forma como placas ou agulhas. Sua transformação é de carácter difusional envolvendo também forças de cisalhamento [5]. Sua estrutura é muito refinada sendo assim mais dura e resistente em relação a perlita, mas ainda possui uma boa relação entre resistência e ductilidade [3].

A martensita é uma fase metaestável formada pelo resfriamento muito rápido da austenita. Sua transformação é de carácter não-difusional. Quando o resfriamento ocorre em taxas muito rápidas não possibilita a difusão do carbono. Como consequência, a estrutura CFC da cementita passa por uma transformação polimórfica para estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC). Quando isso ocorre os



átomos de carbono permanecem em solução sólida intersticial no ferro, formando assim uma solução sólida supersaturada de carbono. Desta forma, essa estrutura é capaz de se transformar em ferrita e cementita rapidamente se fornecida energia suficiente para que isto ocorra. Os grãos de martensita possuem formato de placas e agulhas e são muito duros, resistentes e frágeis [4].

2.3 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são uma classe de aços que possuem alta resistência a corrosão. Este efeito ocorre pela formação de uma película passiva na superfície do material impedindo que processos corrosivos ocorram. Essa película é composta de um óxido de cromo altamente aderente e não poroso na superfície do metal, o qual se forma quando a liga entra em contato com oxigênio. Para que haja a formação desse óxido é necessário no mínimo 11% de cromo na sua composição, o qual deve estar em solução sólida na matriz de ferro [6].

Essa classe de aços é subdividida basicamente em aços inoxidáveis ferríticos, martensíticos e austeníticos, dependendo da microestrutura da matriz, sendo a composição química fator determinante desta [6].

2.4 TRATAMENTO TÉRMICO

Entende-se como tratamento térmico uma operação envolvendo aquecimento e resfriamento onde se mantêm o controle de temperatura, atmosfera, tempo e taxas de aquecimento e resfriamento buscando alterar as propriedades de um metal [1].

Existem tratamentos térmicos que buscam diferentes conjuntos de propriedades, seja endurecimento e aumento de resistência mecânica, homogeneização da microestrutura do material, até melhora de ductilidade e usinabilidade e também resistência ao calor e oxidação [2].

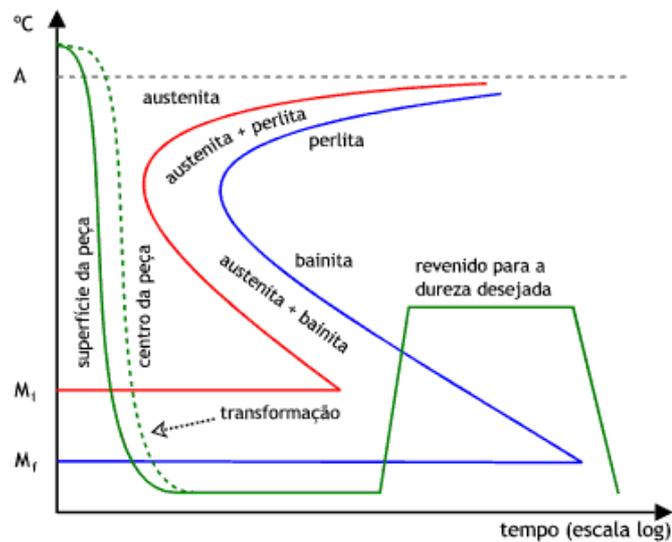


2.4.1 Têmpera e Revenimento

O tratamento térmico de têmpera consiste na transformação de austenita no constituinte metaestável martensita, obtendo assim um material com alta dureza e alta resistência mecânica. Para que isto ocorra é necessário que o metal seja aquecido até uma temperatura acima da linha A1 de transformação austenítica e então seja submetido a um resfriamento rápido cuja curva ocorra a esquerda da curva S no diagrama TTT. Esse resfriamento pode ser realizado em diferentes meios como água, óleo, salmoura, polímero ou mesmo ao ar, dependendo do tipo de material e microestrutura desejada [7].

A martensita é o constituinte mais duro dos aços, porém também é o mais frágil. As reações de transformação martensítica geram grandes tensões internas no material, o que pode desencadear nucleação e propagação de trincas [8]. Para minimizar este efeito, sempre após um tratamento de têmpera é realizada uma operação de revenimento. Como resultado deste, as tensões internas são aliviadas e a fragilidade da martensita é atenuada. Tem-se a partir deste tratamento a martensita revenida. Este tratamento consiste no aquecimento do material já temperado em temperaturas entre 200 e 650°C. O material é aquecido até a temperatura desejada, permanece nesse patamar de aquecimento por um tempo determinado e após é resfriado lentamente até a temperatura ambiente. A temperatura e o tempo dependem do material a ser revenido e da dureza final desejada [7]. A Fig. 3 mostra um diagrama esquemático do tratamento térmico de têmpera seguido de um revenimento indicados no diagrama pelas linhas verdes.

Figura 3: Processo de têmpera e Revenimento em diagrama TTT.



Fonte: Adaptado de [1].

2.4.2 Cementação

O tratamento de cementação é na realidade um tratamento termoquímico, onde há a adição de carbono por meio de difusão no estado sólido a altas temperaturas. O objetivo deste tratamento é modificar as propriedades superficiais do material, mantendo seu núcleo com as características do material de base. Como resultado do tratamento será obtido um material com alto teor de carbono na superfície e baixo teor de carbono no núcleo [9].

Para que a cementação ocorra de forma satisfatória, alguns elementos são primordiais no material de base e nas condições de tratamento. Em primeiro lugar, a força motriz da difusão é a diferença de concentração, neste caso, a diferença de percentual de carbono do meio com o material [3]. Sendo assim, quanto menor a quantidade de carbono no metal de base e quanto maior o teor de carbono no meio em que será realizada a cementação, mais fácil será de ocorrer a difusão. Usualmente, o tratamento de cementação é realizado em aços com teores abaixo de 0,3% C [5].

Além da diferença de concentração outro fato imprescindível na difusão de carbono no aço é o coeficiente de solubilidade do carbono no metal. Como visto nos capítulos anteriores, a austenita é a forma alotrópica do ferro com maior coeficiente de solubilidade do carbono. Sendo assim, este tratamento só ocorrerá de forma



satisfatória em temperaturas acima da transformação austenítica. A própria temperatura possui um fator determinante no tratamento, visto que o aumento de temperatura também aumenta a taxa de difusão [9].

Após a etapa de cementação, os aços devem passar por uma etapa de têmpera e revenido. Como resultado a superfície que agora possui teores de carbono na faixa de 0,6 a 1,0% de carbono terá uma microestrutura rica em martensita revenida (dura, resistente e frágil) e um núcleo tenaz, geralmente com microestrutura de ferrita proeutetóide e perlita. Essas características finais dependerão da liga utilizada e dos elementos de liga presentes nesta [9].

2.5 TRIBOLOGIA

A tribologia estuda a interação entre superfícies com movimento relativo. É de origem grega *tribos* que significa fricção. Esta ciência abrange os fenômenos de atrito, lubrificação e desgaste. O estudo e conhecimento destes fenômenos é de suma importância na indústria, pois busca atenuar os defeitos causados por estes, visando aumento de vida útil de maquinários e ferramentais [10].

Dentre os fenômenos tribológicos o desgaste é um dos mais estudados por ser responsável pela deterioração de elementos que possuem deslizamento e rolamento entre superfícies. Por definição, desgaste ocorre quando há perda progressiva do material de um corpo sólido em contato e movimento relativo com outro corpo sólido, líquido ou gasoso. O desgaste pode ocorrer por adesão, abrasão, fadiga superficial ou ações triboquímicas [11].

O desgaste abrasivo ocorre quando há perda de material decorrente do movimento entre dois corpos pela ação de partículas duras livres ou intrínsecas dos corpos. Esse fenômeno pode ocorrer com desgaste entre dois corpos ou três corpos [12].

A abrasão entre dois corpos ocorre quando as partículas se movem livremente sobre a superfície, como por exemplo, em um lixamento. É dito abrasão entre três corpos quando há partículas abrasivas entre os dois corpos [12].



3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os aços utilizados para o estudo foram o ASTM A-36 e o SAE 8620, ambos obtidos de chapas laminadas a quente, onde todos os corpos de prova foram cortados de uma mesma chapa de cada material. A composição química dos aços em questão foi analisada por meio de espectrometria de emissão ótica, realizada em um espectrômetro da marca Spectro com padrão de aço baixa liga. Esse experimento foi realizado para confirmar se os aços correspondem as respectivas normas.

Os corpos de prova foram fabricados com as dimensões determinadas por norma para cada experimento realizado, sendo utilizado N=3.

As seguintes variações de materiais foram estudadas:

- SAE 8620 cementado (8620C)
- ASTM-A36 cementado (A36C)
- ASTM-A36 soldado e não cementado (A36-SNC)
- ASTM-A36 soldado e cementado (A36-SC)

3.1 REVESTIMENTO DE SOLDA

Foi escolhido o arame sólido de 1,2mm de aço inoxidável martensítico ER-410 (AWS A5.9) do fornecedor Novametal para revestir o aço ASTM-A36. Este arame é comumente utilizado para revestimentos, possui baixo custo e baixo percentual de carbono, sendo relevante para o processo de cementação posterior. A Tabela 1 mostra a composição química do arame de solda.

Tabela 1: Composição química do arame de solda ER-410.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu
%	%	%	%	%	%	%
0,06 máx.	0,50 máx.	0,60 máx.	11,00 – 12,50	4,00 – 5,00	0,40 – 0,70	0,75 máx.

Fonte: Autor, 2023.

O revestimento foi aplicado pelo processo GMAW, utilizando mistura de gás Argônio/Oxigênio 92%/8%. Para o processo de soldagem foi utilizada tensão de 17,7V



e corrente de 135A, com vazão de gás de 15l/min, em uma máquina de soldagem inversora White Martins. Os corpos de prova foram previamente aquecidos a 100°C. Foram aplicados 2 passes de solda, com deposição por filetes. Os corpos de prova foram fresados nas dimensões estabelecidas em norma para cada análise, mantendo uma camada de solda entre 2,0 e 2,5mm.

3.2 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico dos CPs consistiu em 4 etapas: cementação, martêmpera, subzero e revenimento.

A etapa de cementação foi realizada em um forno elétrico com atmosfera gasosa e potencial de 1% de carbono. Os aços SAE 8620 e ASTM A-36 foram cementados em bateladas diferentes. O processo consistiu nas etapas de pré aquecimento, austenitização, difusão e martêmpera em sal fundido.

Para o aço SAE 8620 o material foi pré aquecido a 550°C com patamar de 3h. A austenitização ocorreu com rampa de aquecimento de 8h e patamar em 920°C. Foi inserido a mistura de gases (natural, metanol e nitrogênio) para obtenção da atmosfera carbonetante e manteve-se por 2h. A temperatura foi reduzida para 860°C e mantida por 1h para homogeneização. A martêmpera foi realizada em banho de sal fundido a 180°C e mantida por 1h; material foi retirado do sal e resfriado ao ar até temperatura ambiente.

Para o aço ASTM-A36 as etapas de pré aquecimento, austenitização e difusão foram as mesmas do SAE 8620. A martêmpera foi realizada diretamente da temperatura de 920°C, sendo tempos e resfriamento iguais ao anterior.

Para redução de austenita retida na camada cementada foi realizada uma etapa de subzero a temperatura de -85°C em uma câmara criogênica com nitrogênio líquido. As peças permanecem por 2h a temperatura de patamar. O nitrogênio foi retirado e as peças permaneceram na câmara até que a temperatura estabilizasse próxima de 0°C para evitar choque térmico drástico.

Por último, foi realizado uma etapa de revenimento a 180°C por 4h para aliviar as tensões do processo de tratamento térmico e reaver a martensita formada.



3.3 DESGASTE ABRASIVO EM ROLO DE BORRACHA

Para avaliar a resistência ao desgaste abrasivo foi realizada análise de desgaste abrasivo em rolo de borracha conforme a norma ASTM G65-16 [13]. Os corpos de prova foram fabricados com as dimensões estabelecidas em norma, formato retangular de 25x76mm com 12,7mm de espessura. Os corpos de prova soldados e/ou tratados foram retificados, retirando mínimo de material possível, apenas para dar acabamento e adquirir rugosidade solicitada em norma (Ra máx. de 0,8µm). Para verificar a rugosidade superficial, foi utilizado um rugosímetro portátil SJ-200 da Mitutoyo.

Foi seguido o método A da norma para materiais com alta resistência a abrasão, sendo um tempo de 30 minutos de ensaio, força aplicada de 130N, 6000 rotações (velocidade de 200 rpm), vazão de areia de 300g/min e diâmetro do rolo de borracha de 9". A areia utilizada foi a NBR 7214 n.100, areia que estava disponível para realização do ensaio. Os CPs foram limpos com álcool isopropílico em banho de ultrassom durante 5 minutos para retirada de qualquer impureza e após, pesados em uma balança analítica Marte AD500 com precisão de 3 casas decimais. Após o ensaio, foi repetido o processo de limpeza e pesagem para obter a perda de massa.

3.4 METALOGRAFIA

Os corpos de prova foram preparados metalograficamente conforme a norma ASTM-E3 [14], iniciando com lixamento com lixas grão 80, 120, 240, 320, 400, 500, 600 e 1200. Após foram submetidos a um polimento em pano de feltro com solução de alumina 1µm até obter uma superfície espelhada, livre de riscos.

Para revelar a microestrutura os corpos de prova de 8620C e A-36C foram atacados quimicamente com solução de nital 3% por 3 segundos. Os corpos de prova de A36-SC e A36-SNT foram reveladas em solução Vilela por 15 segundos.

As imagens foram obtidas em um microscópio óptico da marca Olympus BX51M equipado com lentes objetivas de ampliação de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x. A aquisição das imagens foi realizada com uma câmera digital Olympus, modelo SC30.



3.5 MICRODUREZA VICKERS

Para determinação da microdureza e camada cementada efetiva, foi realizado o ensaio de microdureza Vickers de acordo com a norma ASTM E384-11 [15] em um microdurometro SHIMADZU HVM com identador piramidal de diamante, e carga aplicada de 5 N. Foi utilizada a norma ISO 18203:2016 [16] como referência para determinar a camada cementada, a qual é definida pela distância da superfície até o ponto onde a dureza atinge 550HV. Os corpos de prova foram preparados metalograficamente seguindo mesmo procedimento descrito na seção 3.4, porém sem a realização do ataque químico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 mostra o resultado da análise química dos aços utilizados no estudo. O resultado encontrado para cada elemento químico se encontra dentro da faixa determinada por norma [17].

Tabela 2 - Composição química dos aços ASTM A-36 e SAE 8620.

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
	%	%	%	%	%	%
ASTM A-36	0,187	0,369	1,49	--	--	--
SAE 8620	0,191	0,257	0,790	0,458	0,451	0,189

Fonte: Autor, 2023.

A Tabela 3 mostra os resultados do ensaio de abrasão com rolo de borracha para as 4 condições testadas. Para o cálculo de perda de volume foi utilizada a equação padrão de densidade. Para o cálculo foi considerada densidade dos aços ASTM-A36 e SAE 8620 como 7,85g/cm³ e para a solda de aço inoxidável 410 como 7,78g/cm³.



Tabela 3 - Resultados dos ensaios de abrasão com rolo de borracha para cada material testado.

Material	CP	Massa Antes (g)	Massa Depois (g)	Perda de massa (g)	Perda de Volume (mm ³)
8620 C	1	188,177	186,897	1,280	163,057
	2	187,213	185,836	1,377	175,414
	3	188,290	186,896	1,394	177,580
	Média	187,193	186,543	1,350	172,017
A36 C	1	187,928	186,326	1,602	204,076
	2	188,138	186,665	1,473	187,643
	3	187,740	186,406	1,534	195,414
	Média	187,935	186,466	1,536	195,711
A36-SC	1	185,126	184,081	1,045	134,319
	2	185,070	183,948	1,122	144,216
	3	184,762	183,492	1,270	163,239
	Média	184,986	183,840	1,146	147,258
A36-SNC	1	185,816	184,368	1,448	186,118
	2	185,964	184,631	1,333	171,337
	3	186,469	185,242	1,227	157,712
	Média	186,083	184,747	1,336	171,722

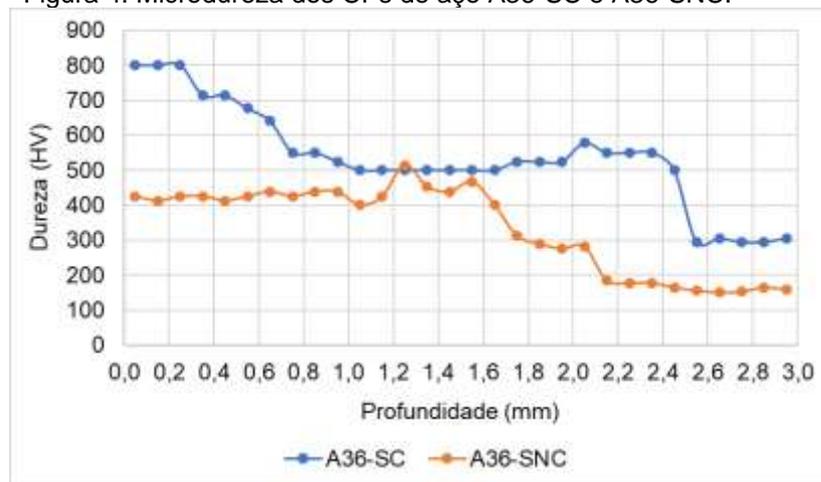
Fonte: Autor, 2023.

Os aços SAE 8620 e ASTM-A36 são comumente utilizados para cementação, sendo que geralmente é considerado o aço 8620 como melhor desempenho. Isso foi comprovado por meio do ensaio de desgaste abrasivo onde o aço A36 possui uma perda de massa 14% maior em relação ao 8620. O resultado do aço A36-SNC obteve uma perda de massa muito próxima ao 8620, isto é, apenas soldando o aço A36 já foi possível obter um aumento de vida útil. O resultado do aço A36-SC obteve o melhor resultado do ensaio de desgaste, com uma perda de massa 14% inferior ao aço A36-SNC. Esse resultado comprova que o tratamento térmico foi efetivo e proporcionou uma melhora considerável na vida útil do material. Para peças de grande porte sujeitas a desgaste abrasivo mas que possuem locais específicos onde o desgaste é mais acentuado, o uso de um aço menos nobre e de menor custo aliado ao processo de soldagem e cementação se mostrou promissor.

O resultado da análise de microdureza é demonstrado nas figuras abaixo. A Fig. 4 mostra o resultado dos CPs de A36-SC e A36-SNC. Observa-se que o

tratamento térmico aumentou consideravelmente a dureza da solda depositada e também a dureza de núcleo do aço base. Esse resultado corrobora com o resultado de desgaste abrasivo.

Figura 4: Microdureza dos CPs de aço A36-SC e A36-SNC.

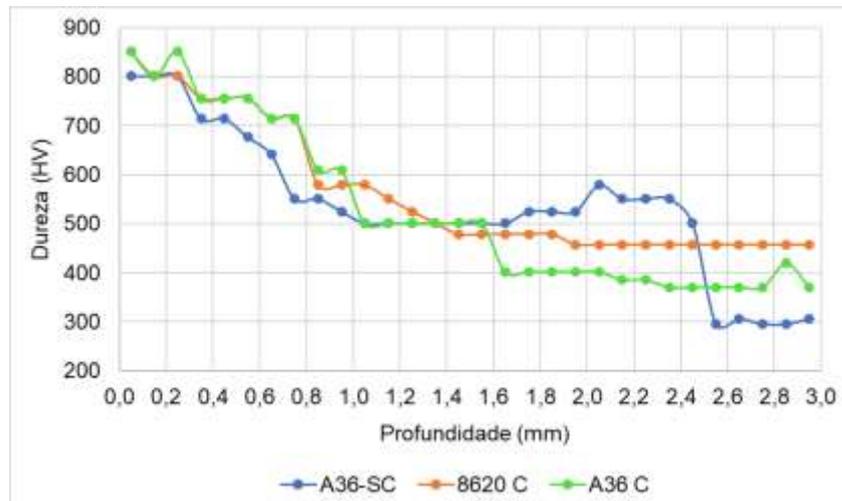


Fonte: Autor, 2023.

A Fig. 5 mostra o resultado comparando os materiais 8620C, A36C e A36-SC. Em relação a dureza superficial os 3 materiais apresentaram durezas muito próximas, sendo o 8620C e o A36C com 850HV e o A36-SC com 800HV.

Segundo a norma ISO 18203 [16] a camada cementada efetiva se dá pela profundidade da superfície em direção ao núcleo até que uma dureza de 550HV seja alcançada. Sendo assim, a camada cementada efetiva do 8620C foi de 1,2mm. Observa-se que a queda da dureza para este material é suave e que a dureza estabiliza em 457HV, sendo essa a dureza de núcleo. Para o A36C a camada efetiva foi de 1,0mm, ligeiramente menor em relação ao 8620C. Outra diferença perceptível é a queda de dureza ao longo do ensaio, a qual ocorre de forma mais abrupta e estabiliza em uma dureza de 370HV, portanto uma dureza de núcleo menor. Esses valores explicam a diferença na perda de volume encontrada no ensaio de desgaste abrasivo, visto que o 8620C possui uma camada efetiva maior e também dureza de núcleo maior.

Figura 5: Microdureza CPs A36-SC, 8620 C e A36 C.

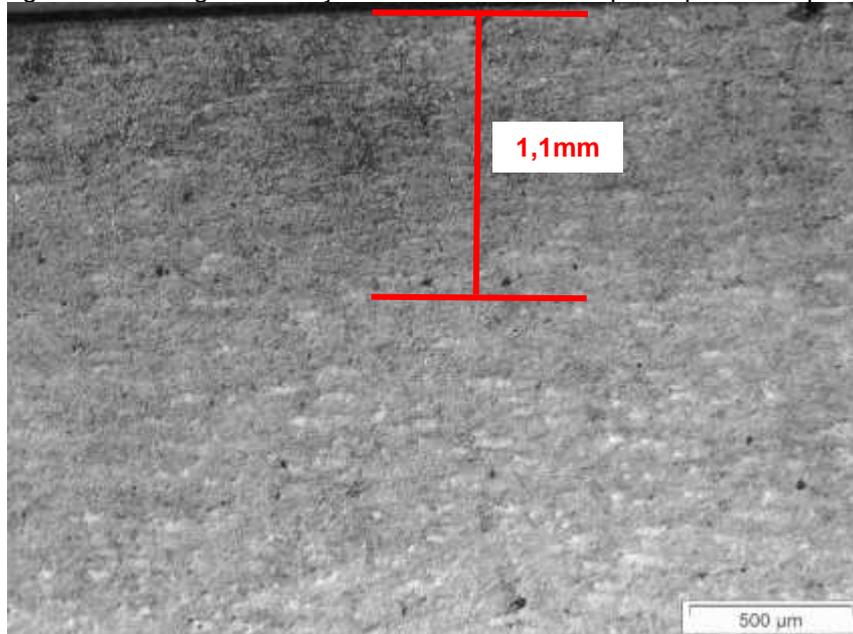


Fonte: Autor, 2023.

Para o material A36-SC o comportamento é diferente em relação aos outros materiais, o que é esperado visto que o material possui uma deposição de solda que é temperável. A camada efetiva seria de 0,85mm, porém o resultado apresentado na Fig. 5 mostra que a dureza se mantém em 500HV até próximo de 1,6mm e volta a subir para um valor por volta de 550HV até 2,3mm. Somente após essa profundidade a dureza cai e estabiliza em 300HV. Esse comportamento ajuda a explicar o resultado de desgaste abrasivo, onde obtive o melhor desempenho dentre todos. À medida que o desgaste ocorre, o material mais mole vai sendo exposto e a tendência é que a taxa de desgaste aumente. Porém, como neste material a dureza se mantém por uma profundidade maior, a taxa de desgaste também se manterá por mais tempo, isto é, enquanto que os outros materiais começam a sofrer desgastes mais severos, o A36-SC mantém uma certa resistência por mais tempo.

As análises de metalografia estão apresentadas abaixo. Para o material 8620 C pode-se observar a camada cementada na Fig. 6 em escala de cinza com ampliação de 50x, onde o contraste das cores indica um maior ataque químico da região que possui maior teor de carbono. A avaliação visual da camada cementada corrobora com o resultado obtido no ensaio de microdureza.

Figura 6: Metalografia do aço 8620 C. Borda do corpo de prova. Ampliação de 50x.



Fonte: Autor, 2023.

Na Fig. 7 é possível visualizar a microestrutura formada na camada cementada do corpo de prova de 8620C, a qual consiste basicamente em martensita revenida finamente distribuída. Na ampliação de 200x observa-se que em alguns pontos há pequenas regiões claras características de austenita retida, porém a quantidade é muito baixa, o que não afeta as propriedades mecânicas do material. Microestrutura corresponde a literatura [18].

A Fig. 8 mostra a microestrutura do núcleo do aço 8620C em ampliações de 200 e 500x. No núcleo observa-se uma microestrutura característica do aço 8620 contendo perlita e ferrita.

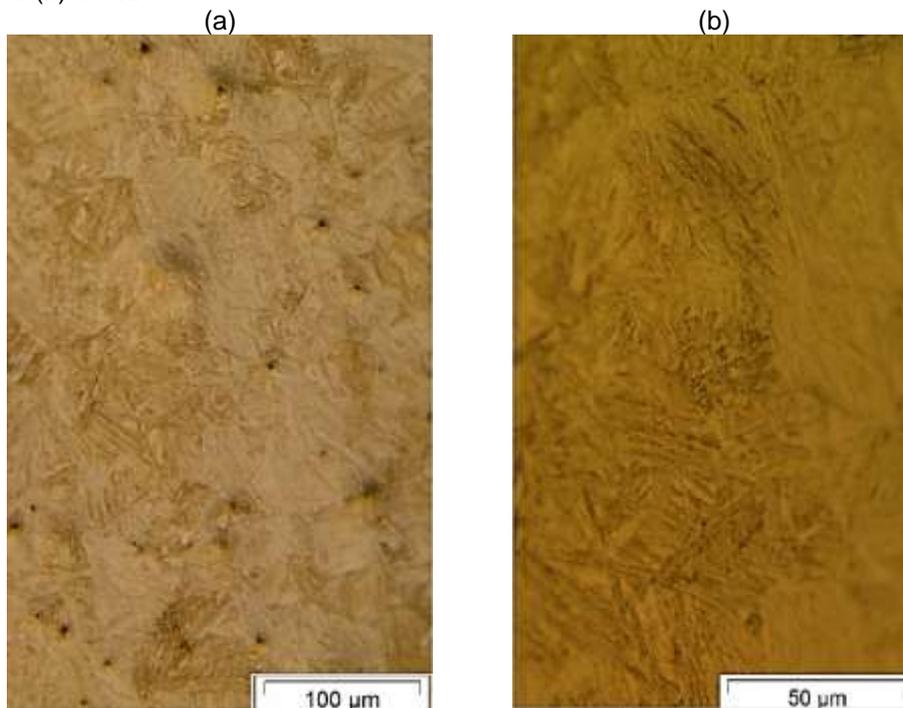
Devido à alta taxa de resfriamento do tratamento térmico aplicado e a baixa espessura do corpo de prova, a microestrutura não se encontra com grãos equiaxiais como de costume, mas sim com estruturas finas e aciculares. Isso explica o fato de a dureza do núcleo ser relativamente alta para um aço de baixo percentual de carbono. A microestrutura foi a espera e condiz com a literatura [18].

Figura 7: Metalografia camada cementada do aço 8620C. Ampliação de 200x.



Fonte: Autor, 2023.

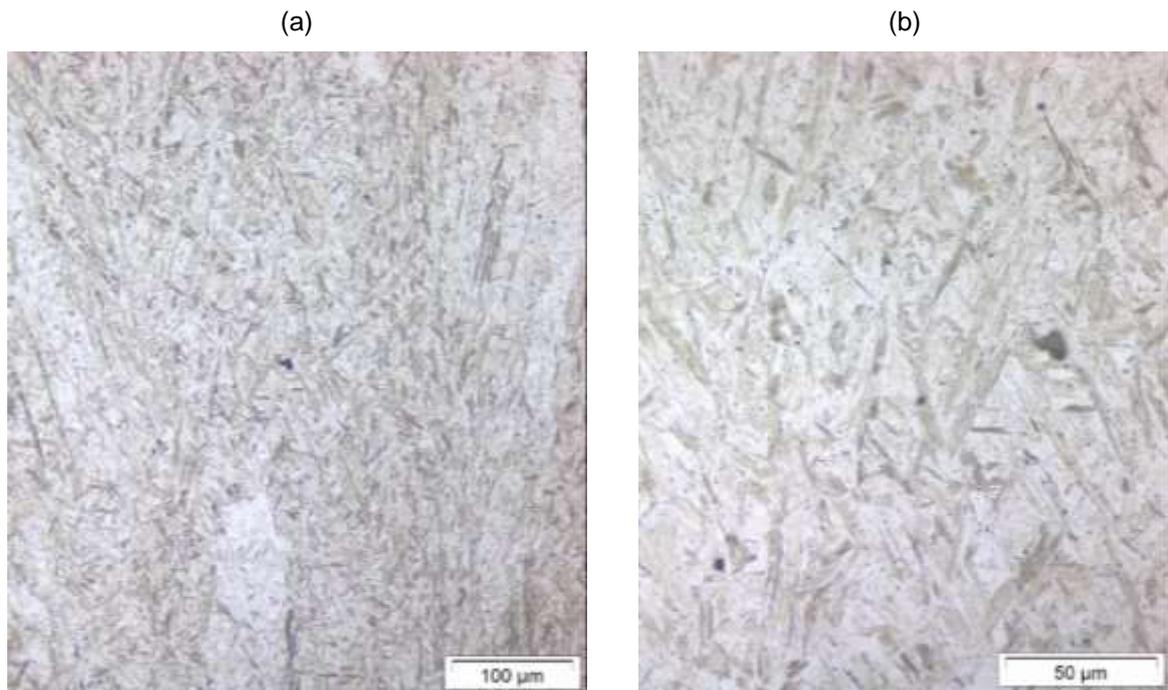
Figura 8: Metalografia do núcleo do aço 8620C com ampliações de (a) 200x e (b) 500x.



Fonte: Autor, 2023.

A Fig. 9 mostra a metalografia do CP A36-SNC, onde observa-se uma microestrutura tipicamente martensítica. As regiões mais claras indicam a presença de Ferrita- δ . A microestrutura encontrada condiz com a literatura [19][20][21].

Figura 9: Metalografia do aço A36-SNC com ampliações de (a) 200x e (b) 500x.



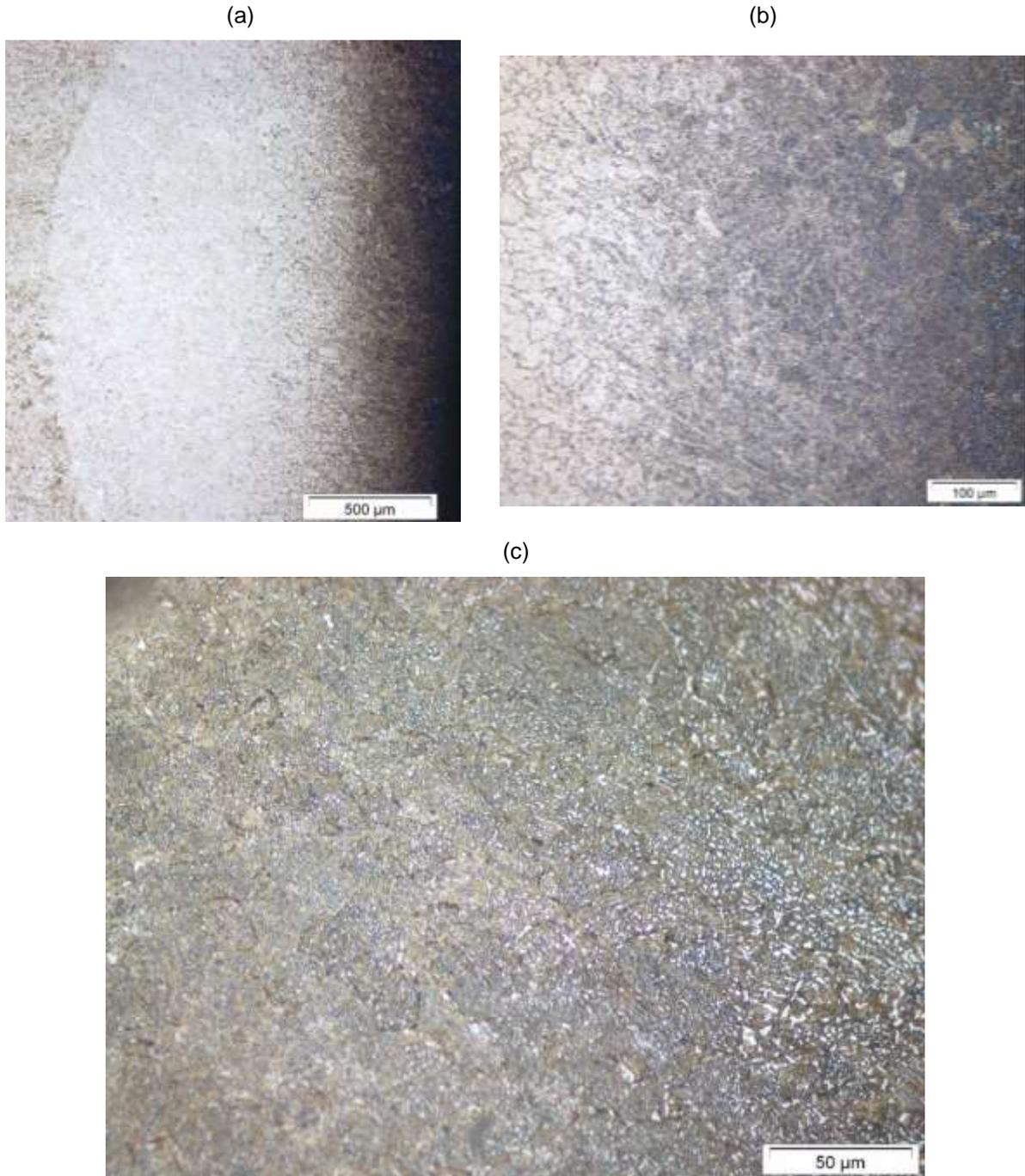
Fonte: Autor, 2023.

A Figura 10 mostra a metalografia do CP A-36SC na superfície do corpo de prova com ampliação de 50x. Na imagem é possível observar que de fato houve difusão de carbono no material depositado. Isso fica evidente pela coloração mais escura na borda do corpo de prova até uma profundidade de aproximadamente 0,4mm. Existe ainda uma zona intermediária que se estende até aproximadamente 0,7mm. Esse resultado corrobora com a análise de microdureza das Fig. 4 e 5.

Em relação a microestrutura formada na superfície, observa-se na Fig. 10 (c) uma grande quantidade de martensita ao longo de toda a seção transversal da amostra (coloração amarelada na imagem). Próximo a superfície fica evidente a formação de grande quantidade de carbonetos (pontos brancos), que se deve ao alto teor de carbono difundido. O lado esquerdo da imagem é relativo a parte mais profunda da amostra, ou seja, em direção ao núcleo, onde vemos uma quantidade menor de carbonetos formados. Isso é o esperado já que a difusão de carbono é

menor ao longo da espessura do CP. Esse resultado é muito importante, pois mostra que de fato houve cementação e não apenas a têmpera do material depositado.

Figura 10: Metalografia da seção transversal do aço A36-SC com ampliações de (a) 50x, (b) 200x e (c) 500x.



Fonte: Autor, 2023.

Na literatura existem muitos estudos de cementação em aços inoxidáveis martensíticos, porém no geral são executados a baixas temperaturas [22][23].



Segundo Cardoso 2019 [24] e Baniyadi et al 2018 [25], os tratamentos convencionais causam a redução da resistência a corrosão dos aços inoxidáveis, pois promovem a formação de carbonetos de cromo, reduzindo a camada passiva de óxido de cromo na superfície do metal. Por este motivo não foram encontrados estudos que utilizem processo de cementação tradicional em aços inoxidáveis martensíticos, sendo assim não foi possível comparar os resultados do material soldado com a literatura. Os resultados supracitados mostram que para uma utilização onde haja solicitação de resistência a desgaste este material e processamento teve ótimo resultado. Todavia, se houver necessidade de resistência a corrosão, seria necessário uma investigação maior antes da aplicação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios demonstraram que é possível utilizar o aço A-36 com deposição de solda dura e cementação em substituição ao aço SAE 8620 cementado.

A caracterização microestrutural do aço soldado e cementado mostrou que realmente houve cementação no material de solda e não somente a têmpera do mesmo. Comparando os resultados com o aço apenas soldado houve um aumento significativo das propriedades mecânicas.

De acordo com os resultados do ensaio de desgaste abrasivo com rolo de borracha, o aço A-36 soldado e cementado apresentou um resultado não somente satisfatório, mas 14% superior ao encontrado no aço SAE 8620. Desta forma, não apenas seria uma opção de substituição de material, mas também uma melhora de performance em relação ao aço de referência.

O resultado da pesquisa trouxe uma nova alternativa para fabricação de peças de grande porte, tendo como opção utilizar um aço de baixo custo e alta disponibilidade, e ainda soldar apenas os locais com maior exigência ao desgaste abrasivo, com uma resistência intermediária no restante da peça.

REFERÊNCIAS

- [1] CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1988. 518 p.



- [2] SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 645p.
- [3] CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 7.ed. [reimpr.] Rio de Janeiro: LTC, 2012. 705 p.
- [4] DOS SANTOS, Rezendo Gomes. **Transformação de fases em materiais metálicos**. 1. ed. São Paulo: Unicamp, 2007. 430 p.
- [5] REED-HILL, Robert E. **Princípios da Metalurgia Física**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1982. 776 p.
- [6] SHEK, Chan Hung; LAI, Joseph Ki Leuk; LO, Kin Ho. **Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments**. Bélgica: Bentham eBooks, 2012. 168 p.
- [7] TOTTEN, G. E. **Steel heat treatment: metallurgy and technologies**. 2. ed. Portland: CRC, 2007. 833p.
- [8] FREITAS, Paulo Sérgio de. **Tratamento térmico dos metais: da teoria à prática**. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2014. 200 p.
- [9] PINEDO, Carlos Eduardo. **Tratamentos térmicos e superficiais do aço**. São Paulo: Blucher, 2021. 326 p.
- [10] WAG, Vivek Pratap; SABOO, Nikhil; GUPTA, Ankit. Tribology13 as emerging Science for warm mix technology: A review. **Construction and Building Materials**. v. 359, 129445, 2022.
- [11] D.I.N. Norma, “50320: análise sistemática dos processos de desgaste”, Classif. Dos fenômenos de desgaste. **Metal. e. Mater**. Vol. 53, p. 619-622, 1997.
- [12] NEALE, Michael J. **Lubrication and reliability handbook**. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [13] ASTM: American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM G65-16. P. 14,2016.
- [14] ASTM: American Society for Testing and Materials, Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM E3-11. p. 12, 2016.
- [15] ASTM: American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. ASTM E384-11. p. 43, 2015.
- [16] ISO: International Organization for Standardization, Steel – Determination of the thickness of surface-hardened layers. ISO 18203:2016. p. 12.



- [17] TOTAL MATERIA: banco de dados. Disponível em: < <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=Home&LN=PT> > Acesso em: 16 de jan. 2023.
- [18] FELDIOREAN, Dorin Ioan; TIEREAN, Mircea Horia. Studies on the Carburizing Process of AISI 8620 Steel, Obtained by MIM Technology. **RECENT**. v. 19, n. 2 (55), 2018.
- [19] ZHU, Bingyue; LIN, Jian; LEI, Youngping; ZHANG, Yongqiang; SUN, Qisong; CHENG, Sihua. Additively manufactured δ -ferrite-free 410 stainless steel with desirable performance. **Materials Letters**. v. 293, 2021.
- [20] ROY, Sougata; SILWAL, Bishal; NYCZ, Andrzej; NOAKES, Mark; CAKMAK, Ercan; NANDWANA, Peeyush; YAMAMOTO, Yukinori. Investigating the effect of different shielding gas mixtures on microstructure and mechanical Properties of 410 stainless steel fabricated via large scale additive manufacturing. **Additive Manufacturing**. v. 38, 2021.
- [21] BAKHSHAYESH, M. Moshkbar; FARZADI, A.; DOUSTAHADI, A.; NOURIPOUR, M. Measurement of degree of sensitization in post-weld heat treated 13Cr-4Ni martensitic stainless steel clad using double loop electrochemical potentiokinetic technique. **Engineering Failure Analysis**. v. 134, 2022.
- [22] SHEUER, Cristiano J.; CARDOSO, Rodrigo P.; MAFRA, Márcio; BRUNATTO, Sílvio F. Effects of the voltage and Pressure on the carburizing of Martensitic Stainless Steel in Pulsed DC Glow Discharge. **Materials Research**. v. 24, 2021.
- [23] GARCIA, M. V.; BERTON, M.A.C.; FERREIRA, O.L.S.; CARDOSO, R.P. Critical Pitting temperature on low temperature plasma carburized AISI 410 stainless steel. **2nd International Seminar on Industrial Innovation in Electrochemistry**. Curitiba, 2016.
- [24] CARDOSO, Rodrigo Perito. Tratamentos termoquímicos a baixa temperatura: formação de fases metaestáveis e seu potencial para novos desenvolvimentos. **Revista Matéria**. v. 24, n.1, 2019.
- [25] BANIASADI, F.; SOVIZI, S.; TODOROFF, P.; AMINI, P.; ASGARI, S. The Nature of Low Temperature Carburized Layer. **Preprints.org**, 2018.