# ESTUDO COMPARATIVO DE USINABILIDADE ENTRE OS AÇOS SAE 1045 E 4340 RECUPERADOS COM SOLDA

## *COMPARATIVE STUDY OF MACHINABILITY BETWEEN STEELS SAE 1045 AND 4340 RECOVERED WITH WELD*

João Paulo Sachetto[I]
Douglas Candido de Oliveira[II]

## RESUMO

Na maioria das fábricas espalhadas pelo mundo, utilizam-se na fabricação de seus produtos, processos que envolvem usinagem e soldagem, direta ou indiretamente. Desses produtos lançados nos mercados, boa parte deles retornam para fazer algum tipo de revisão e consequentemente, algum tipo de reparo, usando os mesmos processos de soldagem e de usinagem. As peças fabricadas ou recuperadas por soldagem, podem, em alguns casos ser produzidas com as dimensões finais ou próximas a final, mas normalmente estas peças precisam sofrer operações complementares para chegar às dimensões finais com a tolerância dimensional especificada. Neste estudo foi analisado um caso típico de recuperação, usando o processo de soldagem por eletrodo revestido em seis corpos de prova, sendo três deles de aço SAE 1045, soldados com o eletrodo E7018, e os demais de aço SAE 4340, soldados com o eletrodo E8018 B2. Cada liga foi submetida a três situações diferentes de soldagem: pré-aquecimento, pós-aquecimento e a terceira situação sem qualquer condição especial, após a recuperação por soldagem, foram feitos ensaios de usinabilidade em todos os corpos de prova, utilizando um torno mecânico convencional e inserto de corte apropriado para os materiais ensaiados. Foram medidos e analisados o desgaste da ponta da ferramenta em cada situação, bem como a medição da rugosidade superficial, usando um equipamento adequado e medindo em escala RA. Os resultados mostraram a necessidade de pré aquecimento em todos os corpos de prova, sendo de notável importância este procedimento para a soldagem de recuperação de desgastes e que, posteriormente, passará por operações de usinagem.

**Palavras-chave:** Usinabilidade. Aço SAE 1045. Aço SAE 4340. Soldagem.

## ABSTRACT

In most factories around the world, use it to manufacture your products that involve machining and welding, directly or indirectly. Of these products launched in the markets, part of them returned for some kind of revision and consequently some kind of repair, using the same welding and machining processes. As parts manufactured or salvaged by welding, they may in some cases be produced with final or final limits, but damage usually caused by special operations is used to reach final dimensions with specified dimensional tolerance. In this study, a typical recovery case was analyzed using the electrode welding process coated on six specimens, three of them SAE 1045 steel, welded with the E7018 electrode, and the other SAE

[I] Prof. Me. da Faculdade de Tecnologia (FATEC) – Sertãozinho – SP – Brasil. E-mail: joao.sachetto@fatec.sp.gov.br
[II] Professor do Senai Oscar Lúcio Baldan – Matão – SP – Brasil. E-mail: olicaan@yahoo.com

4340 steel, welded with the electrode. E8018 B2 Each alloy was subjected to three different welding situations: preheating, after heating and the third situation without special condition after weld recovery, machinability tests were performed on all specimens using a conventional mechanism. and cutting insert suitable for the materials tested. They were measured and analyzed or use the tool tip in each situation, as well as use the surface roughness, using appropriate equipment and measuring on the RA scale. The obtained results show the necessity of preheating in all the specimens, being remarkable the importance of this procedure for the welding of wear recovery and that later will undergo machining operations.

**Keywords:** Machinability. Steel SAE 1045. Steel SAE 4340. Welding.

Data de submissão do artigo: 15/07/2019.
Data de aprovação do artigo: 01/10/2019.
DOI:

## 1 INTRODUÇÃO

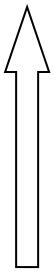
Os materiais de construção mecânica, por classificação, são divididos em quatro grandes grupos de desenvolvimento tecnológico. O primeiro em grande escala de uso e mais antigo é o grupo de materiais metálicos (PADILHA,1997). Em determinadas aplicações esses materiais são submetidos a esforços diretamente e, esses esforços que são das mais variadas natureza provoca no material, desgastes, perdas de medidas e massa metálica exigindo-se assim em certos casos a recuperação dos mesmos, pois devido ao tamanho ou forma não é viável descarte do material e sim uma aplicação de revestimento por meio de soldagem. Em determinadas situações, desgastes na ordem de 0,10 mm são o suficiente para o componente mecânico comprometer o funcionamento e eficácia do equipamento todo.

Peças de equipamentos em certos casos, trabalham em contato ou com folgas na ordem de centésimos ou décimos de milímetro e, esta condição faz com que os materiais sofram atritos, e esses atritos naturais ao longo do tempo de funcionamento do equipamento, provocam em uma ou em duas superfícies em contato, deformações e perda de material, como a maioria dos equipamentos passam por revisões e manutenções periodicamente ou até mesmo quando o funcionamento é comprometido devido a esses esforços, esses componentes são recuperados por meio de soldagem, onde é aplicada uma camada de material soldado e posteriormente é feita a usinagem a fim de reestabelecer as medidas originais pré-determinadas em projetos mecânicos. Neste sentido, este trabalho teve o objetivo de avaliar a usinabilidade de dois diferentes aços, comumente usados nas indústrias.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A usinabilidade depende de condições intrínsecas do material (estado metalúrgico) da peça e de condições extrínsecas (condições de usinagem). Dentre as condições intrínsecas podemos destacar a composição química do material, sua microestrutura e propriedades mecânicas (dureza, resistência) e físicas (condutividade térmica). Como condições extrínsecas temos, por exemplo: os parâmetros de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte), tipo de corte (contínuo ou interrompido), geometria de ferramenta, uso de fluido de corte etc. (DINIZ; MARCONDES; COPPINI., 2014). De maneira geral quanto à composição os materiais podem ser classificados da seguinte forma:

**Tabela 1 – Usinabilidade das principais ligas metálicas**

| Material | Usinabilidade |
|---|---|
| Ligas de Magnésio<br>Ligas de alumínio<br>Ligas de Cobre<br>Ferro fundido<br>Ferro fundido nodular<br>Aço carbono<br>Aço baixa liga<br>Aço inoxidável<br>Aço endurecidos e de alta liga<br>Super ligas de Níquel |  |

**Fonte: elaborada pelos autores (2019)**

Entendem-se, como propriedades de usinagem de um metal, aquelas que expressam o seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem (FERRARESI, 1970). Para avaliação da usinabilidade, são, geralmente, usados quatro critérios, utilizados isoladamente ou em conjunto:

- Vida da ferramenta.
- Força de usinagem.
- Qualidade superficial da peça.
- Formação de cavacos (forma e tamanho de cavacos)

Segundo Mills e Redford (1983), existem 5 mecanismos básicos de desgaste de ferramenta: desgaste abrasivo, desgaste adesivo, desgaste difusivo, desgaste causado por ação eletroquímica e desgaste por fadiga superficial.

O mecanismo mais comum entre todos é o desgaste por abrasão, que é causado pelo movimento relativo entre a superfície inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta, e entre a nova superfície de corte e a aresta de corte da ferramenta. Este mecanismo geralmente causa desgaste de flanco, devido ao movimento relativo entre a aresta de corte e a nova superfície da peça e desgaste de cratera, devido ao movimento entre o cavaco e a superfície de saída. Considerando que o desgaste de flanco é aquele que mais comum observados em insertos de usinagem, optamos por considerar nesta pesquisa, esse tipo de avaria na ferramenta de corte.

## 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O metal base empregado neste experimento, foi uma barra redonda de aço SAE 1045, denominado aço ao carbono, com 38,1 mm de diâmetro e uma barra redonda de aço SAE 4340, denominado aço baixa liga, com as mesmas dimensões do aço anterior, cujas composições químicas e propriedades mecânicas estão representadas nas tabela 2.

**Tabela 2 – Composição química dos metais base**

| | C | Si | Mn | S máx. | P máx. | Cr | Ni | Mo |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **SAE 1045** | 0,45 | 0,25 | 0,75 | 0,040 | 0,040 | | | |
| **SAE 4340** | 0,40 | 0,27 | 0,70 | 0,040 | 0,040 | 0,80 | 1,80 | 0,25 |

**Fonte: Moot (2015)**

**Tabela 3– Propriedades mecânicas dos metais base**

| | Limite de Escoamento min. (Mpa) | Limite de Resistência (Mpa) | Alongamento % min. |
|---|---|---|---|
| **SAE 1045** | 310 | 565 | 16 |
| **SAE 4340 (Normalizado)** | 860 | 1280 | 12,2 |

**Fonte: Moot (2015)**

O material de adição utilizado para a soldagem do aço SAE 1045 foi um eletrodo revestido de alma metálica E7018, com 2,5 mm de diâmetro, fabricado pela BÖHLER e comercialmente conhecido por BÖHLER FOX 7018. Este foi escolhido por ser básico com boas características de soldagem, apresentar bons rendimentos metálicos e indicado para a soldagem de aços com baixos teores de impurezas e elevados teores de carbono, sendo aplicado em estruturas metálicas em geral como em soldagem de tanques, construção de máquinas e equipamentos, amanteigamento na reconstrução de aços com alto teor de carbono. Nas tabelas 4 e 5 apresentam respectivamente a composição química e as propriedades mecânicas deste material de adição:

**Tabela 4 – Composição química do eletrodo E7018**

| Mn | Si | Ni | Cr | Mo | V | Mn+Ni+Cr+Mo+V |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,6 | 0,75 | 0,3 | 0,20 | 0,30 | 0,08 | 1,75 |

**Fonte: Fortes (2005)**

**Tabela 5 – Propriedades mecânicas do Eletrodo E7018**

| Limite de Escoamento min. (Mpa) | Limite de Resistência (Mpa) | Alongamento % min. | Impacto Charpy V (J) -30º |
|---|---|---|---|
| 400 | 490 | 22 | 27 |

**Fonte: Fortes (2005)**

O material de adição utilizado para a soldagem do aço SAE 4340 foi um eletrodo revestido de alma metálica E 8018 B2, com 3,0 mm de diâmetro, fabricado pela BÖHLER e comercialmente conhecido por BÖHLER FOX DCMS Kb-B. Escolhido por ser básico e ter baixo hidrogênio, sendo indicado para soldagem de aços de caldeira, chapas e tubos com 1%Cr e 0,5%Mo em sua composição, indicado para uso em condições de fluência e temperaturas de serviço de até 570 ºC. Apresenta elevada ductilidade e resistência à trincas, sendo que o metal de solda depositado pode ser tratado termicamente. O rendimento metálico é de aproximadamente 115%. As Tabelas 6 e 7 apresentam respectivamente a composição química e as propriedades mecânicas deste material de adição.

**Tabela 6 – Composição química do eletrodo E8018 B2**

| C | Si | Mn | Cr | Mo |
|---|---|---|---|---|
| 0,07 | 0,4 | 0,8 | 1,1 | 0,5 |

**Fonte: Fortes (2005)**

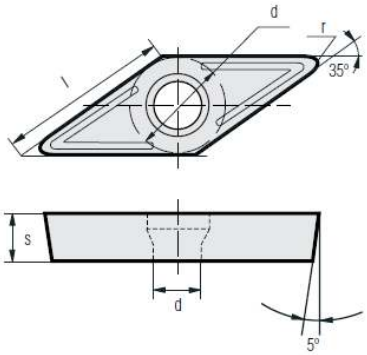
**Tabela 7 – Propriedades mecânicas do eletrodo E8018 B2**

| Limite de Escoamento min. (Mpa) | Limite de Resistência (Mpa) | Alongamento % min. | Impacto Charpy V (J) -30º |
|---|---|---|---|
| 530 | 630 | 23 | 45 |

**Fonte: Fortes (2005)**

A pastilha de torneamento utilizada foi da geometria tipo "V", fabricada pela BRASSINTER, de acordo com as dimensões apresentadas na figura 1.

**Figura 1 – Dimensões e imagem do inserto**



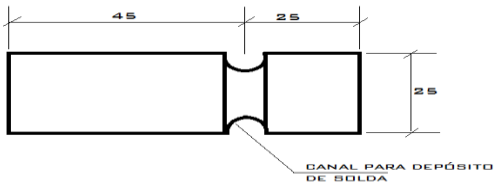

| ISO | ANSI | l mm in | d mm in | s mm in | r mm in | d1 mm in |
|---|---|---|---|---|---|---|
| VBMT 160408 | VBMT 332 | 16,5 .650 | 9,52 .375 | 4,76 .187 | 0,8 .031 | 4,4 .173 |

**Fonte: Brassinter (2012)**

Neste estudo foram fabricados 6 corpos de prova, sendo que 3 deles são de aço SAE 1045 e os outros de SAE 4340. Ficando denominados da seguinte forma: Peças 1,2 e 3 são de aço SAE 4340, as 4,5 e 6 são de aço SAE 1045, marcados individualmente por meio mecânico (puncionado), para que durante o processo as marcas não se apagassem.

Quanto às dimensões destes CPs, analisando a bibliografia estudada, não se tem um padrão específico para a realização deste ensaio de usinabilidade, ou seja, este ensaio tem como objetivo ressaltar a importância de um pré e ou pós-aquecimento para a realização de uma solda de manutenção em diferentes tipos de materiais metálicos. Neste trabalho, adotou-se como padrão a elaboração de CPs para soldagem conforme o desenho esquemático mostrado na figura 2. A partir dele, construiu-se os CPs, sendo três de cada tipo de aço utilizado, sendo apresentados na figura 3.

**Figura 2 - Dimensões e Padrão adotado para soldagem e ensaio de usinabilidade**




**Fonte: elaborada pelos autores (2019)**

**Figura 3 - CPs produzidos para a realização dos ensaios**



**Fonte: elaborada pelos autores (2019)**

Neste estudo, foram criadas situações especiais de soldagem para cada CP, que estão apresentados na tabela 8.

**Tabela 8 - Situações criadas em cada corpo de prova**

| CP | Material | PRÉ-AQUECIMENTO | PÓS-AQUECIMENTO | A FRIO |
|---|---|---|---|---|
| CP 01 | Aço SAE 4340 | X | | |
| CP 02 | Aço SAE 4340 | X | X | |
| CP 03 | Aço SAE 4340 | | | X |
| CP 04 | Aço SAE 1045 | X | | |
| CP 05 | Aço SAE 1045 | X | X | |
| CP 06 | Aço SAE 1045 | | | X |

**Fonte: elaborada pelos autores (2019)**

Para os aços citados acima em geral, fórmulas de carbono equivalente (CE) são comumente usadas para estimar a necessidade de cuidados especiais na sua soldagem.

Preferencialmente, o CE deve ser calculado para a composição real do aço. Quando esta não é conhecida, os teores máximos na faixa da especificação do aço devem ser considerados por segurança. Um metal base é considerado facilmente soldável com o processo SMAW quando CE < 0,40.

Acima deste nível, cuidados especiais são necessários. Processos de soldagem de baixo hidrogênio devem ser usados e pode ser necessário pré-aquecer a junta. Quando CE > 0,60, deve usar pré-aquecimento para juntas com espessura acima de 20 mm. Quando CE > 0,90, um pré-aquecimento a uma temperatura elevada é absolutamente necessário para todos os casos, exceto para juntas de muito pequena espessura.

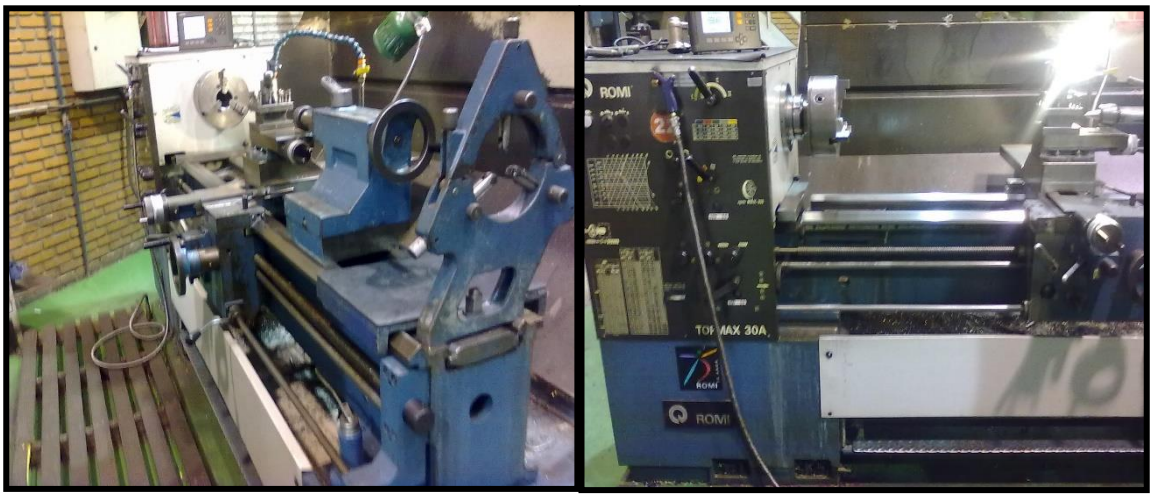
O CE calculado pela fórmula e a porcentagem dos elementos de liga dados na tabela 4 acima teve como resultado para:

- SAE 4340 = CE = 0,8725
- SAE 1045, por se tratar de um aço que apresenta valores de elementos de ligas ignorados para fins de cálculos, o seu CE fica simplesmente o seu valor em porcentagem de carbono, que é de 0,45%.

O ensaio de usinabilidade foi realizado para caracterizar a facilidade ou não de usinar as peças soldadas de acordo com seus processos e suas composições químicas, medindo o desgaste da ponta da ferramenta (pastilha), ao longo do processo de torneamento. Para isso, foi

utilizado um torno universal horizontal do modelo TORMAX 30, mostrado na Figura 4, fabricado pela ROMI S/A, no qual utilizou-se a pastilha citada.

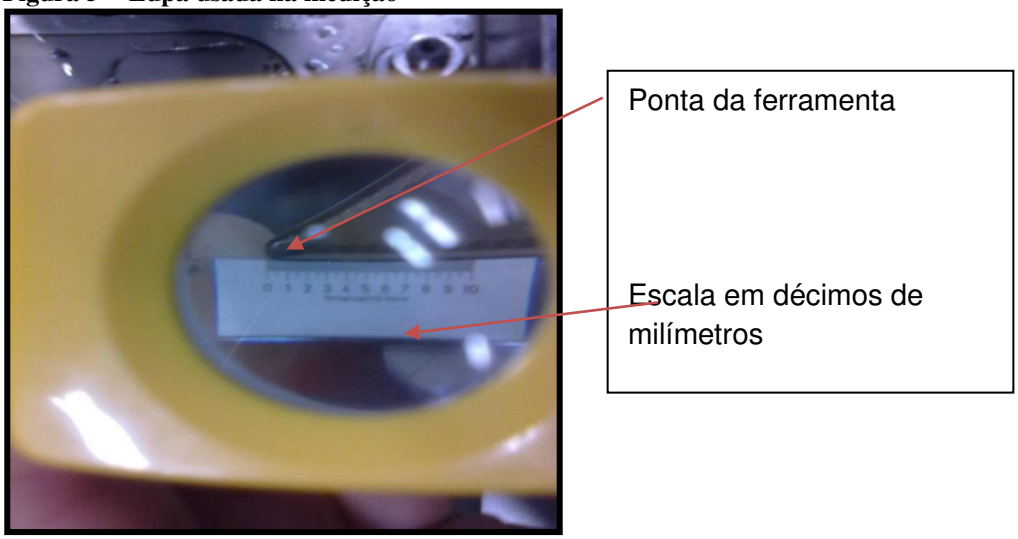
**Figura 4 - Torno horizontal universal**




**Fonte: elaborada pelos autores (2019)**

Com parâmetros de corte calculados previamente de acordo com as informações dos materiais que foram utilizados são: A VC usada na usinagem de todos os corpos de prova foi 40 m/min, assim calculando o "n" em função da VC ficou em 510 rpm, com um avanço de 0,15 mm/v, usando refrigerante em todo o processo afim de diminuir o aquecimento causado pela usinagem. Foram usinados retirando 1 mm (no diâmetro) de cada passe, sendo realizados 4 passes, e verificado o desgaste da ponta, entre um passe e outro, registrando os resultados. A medição foi feita com o auxílio de uma lupa de aumento (8x), fabricada pela SANDIVIK, avaliando-se o desgaste, conforme apresentado na figura 5.

**Figura 5 - Lupa usada na medição**




**Fonte: elaborada pelos autores (2019)**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as discussões são apresentados nessa seção.

### 4.1 Usinabilidade

Os resultados obtidos nos ensaios foram registrados de forma que o foram analisados os desgastes após cada passe da usinagem, como mostrados na tabela 9.

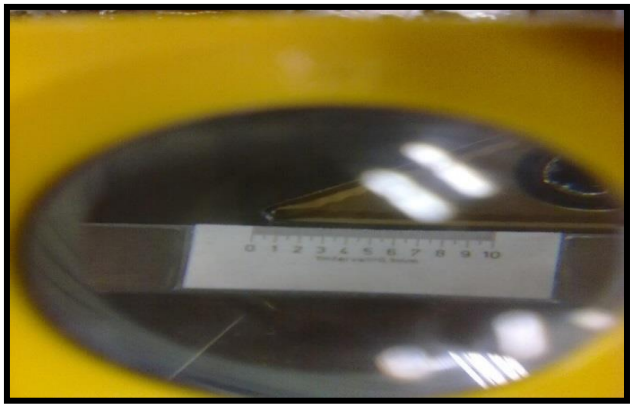
**Tabela 9 - valores de desgaste medidos nos insertos**

| *CP* | *1° Passe* | *2° Passe* | *3° Passe* | *4° Passe* |
|---|---|---|---|---|
| ***01*** | 0,0 | 0,0 | 0,05 | 0,1 |
| ***02*** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| ***03*** | 0,2 | 0,4 | 0,7 | 0,8 |
| ***04*** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| ***05*** | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| ***06*** | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 |

**Fonte: elaborada pelos autores (2019)**

O tipo de desgaste observado foi o de flanco sendo provocado por mecanismos abrasivos, devido as mudanças microestruturais na superfície usinada, conforme mostra, por exemplo a figura 6. Neste passe final o resultado foi de 0,8 mm, ficando clara a dificuldade de se usinar e comprometendo 100% do raio útil da pastilha, não havendo condições para uma usinagem posterior.

**Figura 6 - Medição do CP 03, passe 04**



**Fonte: elaborada pelos autores (2019)**

### 4.2 Rugosidade

Para a medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo - modelo SJ-201P, cód. nº178-923ª, Serial nº410502, e os resultados obtidos estão mostrados em relatório de avaliação apresentado na figura 7.

**Figura 7 - Medidas de rugosidade encontradas nas amostras**

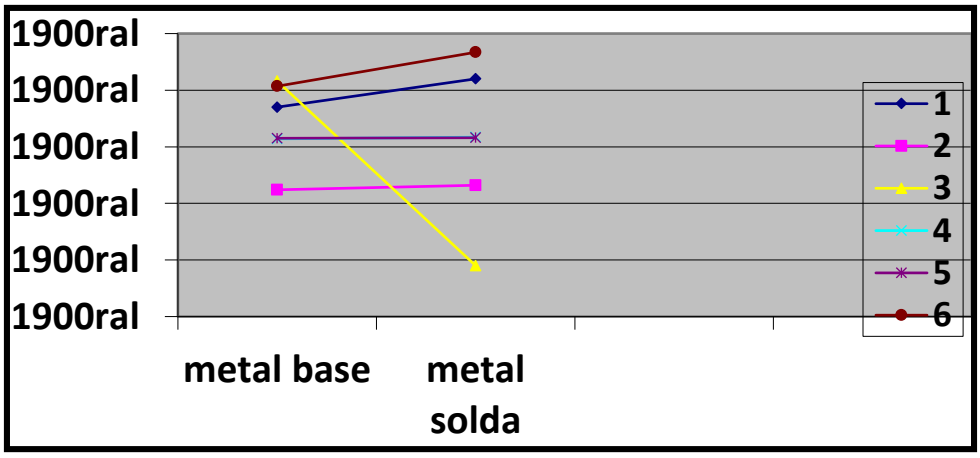
| Relatório de Avaliação de Amostra | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Análise Dimensional de Rugosidade | | | | | | | | | | | | | Nº xxxx/xx<br>Data: 28.05.12 | |
| DESCRIÇÃO DA PEÇA : | Corpos de Prova Cilindricos | | | | | | | | | | | DESENHO: | xxx-xxxx | |
| ITEM | MEDIDAS | | | | | | | | | | | APROVADA | | INSTR. USADO | OBSERVAÇÃO |
| | ESPECIFICADAS | ENCONTRADAS | | | | | | | | | | SIM | NÃO | | |
| | | 1 | 2 | Ra | | | | | | | | | | | |
| 1 | SAE 4340 | 3,70 | 4,20 | | | | | | | | | | | 10 | 1- na MB e Solda ; 2 - na Solda |
| 2 | SAE 4340 | 2,24 | 2,32 | | | | | | | | | | | 10 | 1- na MB e Solda ; 2 - na Solda |
| 3 | SAE 4340 | 4,16 | 0,90 | | | | | | | | | | | 10 | 1- na MB e Solda ; 2 - na Solda |
| 4 | SAE 1045 | 3,14 | 3,17 | | | | | | | | | | | 10 | 1- na MB e Solda ; 2 - na Solda |
| 5 | SAE 1045 | 3,15 | 3,16 | | | | | | | | | | | 10 | 1- na MB e Solda ; 2 - na Solda |
| 6 | SAE 1045 | 4,07 | 4,67 | | | | | | | | | | | | |
| CÓDIGO DO INSTRUMENTO : ① Paquimetro ② Paquimetro de Profundidade ③ Micrometro ④ Micrometro de Profundidade ⑤ Imicro ⑥ Traçador de Altura ⑦ Projetor de Perfil ⑧ Calibrador de Rosca ⑨ Base com Relógio ⑩ Outros | | | | | | | | | | | | | | | |

**Fonte: elaborada pelos autores (2019)**

Os resultados da análise de superfície por rugosidade foram medidos em uma escala Ra, ou seja, medidas pontuais em um espaço de 2,5 em 2,5 mm de comprimento com um total de 15 mm, e feito uma média de todos os resultados numa mesma amostra, tanto no metal de base quanto no metal de adição juntamente com sua ZTA.

E em todos os casos observados no relatório, o metal de base apresentou resultados menores que o metal de solda, exceto no CP 03 onde o aço ensaiado é pelas suas características de carbono equivalente alto e ter sido temperado e sem haver um pré nem um pós-aquecimento, pode ter ocasionado consequentemente uma dureza maior na região termicamente afetada pelo calor, dificultando o processo de usinagem. Esta região ficou acima das demais superfícies e com aspecto mais liso. Estes resultados foram colocados na figura 8, juntamente com os demais CPs para melhor observação.

**Figura 8 - Resultado da análise de rugosidade**




**Fonte: elaborada pelos autores (2019)**

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados dos ensaios, baseados no desgaste da ferramenta e analise da rugosidade superficial, mostram que, além do pré-aquecimento, em alguns aços, particularmente aqueles possuindo carbono equivalente maior que 0,45%, pode ser necessário também um tratamento de pós-aquecimento. No entanto, também de acordo com os resultados obtidos, para a maioria dos aços carbono e de baixa liga, somente o pré-aquecimento é necessário de um modo geral.

No primeiro aço SAE 4340, seu carbono equivalente calculado foi 0,87, então necessitaria de um pré e um pós-aquecimento, pois no CP 01 somente com o pré-aquecimento não obteve resultados satisfatório no ponto de vista estrutural, (frágil na região da ZTA), de usinabilidade e de custo, (com pastilhas e perca de produtividade), no CP 02, os resultados foram desejáveis, pois sua estrutura ficou homogênea juntamente com o metal de base, simplesmente por ter sido soldado dentro das condições de pré e pós-aquecimento, diminuindo custo de retrabalho, insertos, mão de obra e produtividade.

O resultado indesejável deste estudo ficou com CP 03, que por sua vez não passou pelo processo de pré e de pós-aquecimento, oferecendo uma condição de usinagem totalmente insatisfatória, pois não se conseguiu usinar devido a sua ZTA apresentar uma superfície muito dura, compatível com uma microestrutura martensítica, no entanto para comprovar esta transformação de fase, necessitaria de analises metalográficas e ensaios de dureza, técnicas que não foram usadas nesta pesquisa. Esta condição de usinagem acima citada, aumenta os custos com refugo de peça, desgaste acelerado de insertos, retrabalho, mão de obra e perdas da produtividade.

No aço SAE 1045, os resultados obtidos nos corpos de prova 04 e 05 foram praticamente os mesmos, indicando assim que o aço com 0,45% de carbono e sem elementos de liga necessitou apenas de um pré-aquecimento para obter resultados desejáveis, pois o CP 04 passou pelo processo de pré-aquecimento, e o CP 05, além do pré, passou também pelo pós-aquecimento, ambos tendo resultados satisfatórios quanto a vida útil da ferramenta de corte.

E finalmente no CP 06, os resultados não foram satisfatórios, pois este aço não passou pelo processo de pré e de pós-aquecimento, deixando claro que nesta porcentagem de carbono, mesmo não sendo um aço ligado, necessita de um pré-aquecimento para a execução de uma solda, seja de produção quanto de manutenção corretiva.

## REFERÊNCIAS


BRASSINTER. **Catálago de insertos para torneamento**. São Paulo, 2012. 20 p.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Metais.** 4 ed. São Paulo: Artilber. 2013.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**, 1 ed. São Paulo: Blucher. 1970.

FORTES, C. **Eletrodo Revestido. Apostila da Esab**. São Paulo. 2005

MILLS, B.; REDFORD, A. H.,**Machinability of Engineering Materials Applied Science.** Publishers, London. 1983.

MOTT, R. L. **Elementos de máquinas para projetos mecânicos**. 5 ed. Rio de Janeiro: Pearson. 2015

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia microestrutura e propriedades**. 2 ed. São Paulo:.Hemus Editora. 1997.