

## CARACTERIZAÇÃO DA ZONA TERMICAMENTE AFETADA PRODUZIDA PELO CORTE A PLASMA NO AÇO ABNT NBR 6655 GRAU LN 280

Maurício Belchor Barcelos, mbelchor@hotmail.com<sup>1,2</sup>

Felipe Tusset, felipe.tusset@unijui.edu.br<sup>3</sup>

Diego Tolotti de Almeida, diegot@bruning.com.br<sup>2</sup>

Cristiano José Scheuer, cristiano.scheuer@ufsm.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Tecnologia e Mecânica dos Materiais. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Bruning Tecnometal Ltd., Panambi, RS, Brasil.

<sup>3</sup> Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, RS, Brasil

**Resumo.** As operações de usinagem térmica introduzem modificações na região adjacente ao corte, as quais exercem efeito sobre a microestrutura e distribuição de tensões no material usinado, que por sua vez determinam as propriedades mecânicas e desempenho das arestas de corte. Além disso, os processos de corte térmico alteram a rugosidade e textura da superfície afetando o seu acabamento. Nesse sentido, neste trabalho é realizada a caracterização da zona afetada pelo corte térmico produzida em placas de aço ABNT NBR 6655 GRAU LN 280 com 25 e 30 mm de espessura, submetidas à operação de corte a plasma. Para tanto, a seção transversal das amostras foi caracterizada metalograficamente utilizando microscopia óptica, e por medidas de microdureza e de tensão residual. Adicionalmente, as superfícies resultantes do corte foram caracterizadas topograficamente utilizando perfilometria 3D. Os resultados mostram que a extensão da zona afetada pelo corte térmico e as modificações produzidas na microestrutura, microdureza, perfil de tensão residual e textura das arestas de corte são similares em ambas as amostras analisadas, denotando uma baixa influência da potência específica de corte, sob as condições avaliadas neste trabalho.

**Palavras chave:** Corte a plasma. Zona afetada pelo corte térmico. Aço ligado ao Manganês. Tensão residual.

### 1. INTRODUÇÃO

As operações de corte constituem uma parte essencial da rota de fabricação de componentes em aço. Estes processos permitem a transformação das placas metálicas fornecidas pelas usinas siderúrgicas, em peças com geometrias específicas para serem processadas por outras técnicas de fabricação [1]. Entre as diferentes técnicas de corte atualmente disponíveis, os processos de corte térmico desempenham um papel de destaque devido à gama de aplicações às quais estes podem ser especificados. Dentro desta categoria, existe um leque de opções de processos, os quais são selecionados, principalmente, em função das dimensões das peças a serem cortadas, perfil do corte, classe de material e custos operacionais.

Nas últimas décadas o aumento da demanda por chapas grossas devido ao acréscimo das dimensões das estruturas de engenharia, tem renovado o interesse no processo de corte a plasma [2]. Este processo é usualmente utilizado em operações de corte bidimensional (2D) de peças espessas, apresentando grande versatilidade e alta taxa de produção, além da facilidade de execução e baixo custo. No entanto, sua aplicação também exhibe limitações, constituindo a principal delas as alterações produzidas na estrutura cristalina do material devido ao efeito do calor aportado, face às altas temperaturas necessárias para o corte [3-4].

O processo de corte a plasma (do inglês, *Plasma Arc*

*Cutting – PAC*) emprega energia de natureza térmica, através da ionização de um gás (plasma), para efetuar a usinagem de qualquer material eletricamente condutor [1]. Neste caso, o plasma é estabelecido pela aplicação de uma diferença de potencial elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a peça. A temperatura do plasma pode atingir valores da ordem de 30.000 °C e velocidades de ejeção equivalente à velocidade do som [5].

Devido às suas características intrínsecas, o corte a plasma introduz modificações na superfície e sub-superfície das arestas de corte, alterando a sua topografia e microestrutura [6]. Essas mudanças resultam em variações locais na textura superficial e propriedades mecânicas da zona afetada pelo corte térmico (ZACT); devido à introdução/ modificação dos perfis de tensões residuais nas áreas próximas as arestas de corte [7-8].

Embora o processo PAC seja de aplicação comum no setor industrial, e a crescente demanda por chapas grossas tenha intensificado o seu emprego; ainda existem algumas lacunas tecnológicas a serem contempladas envolvendo a sua utilização, requerendo estudos complementares para obter-se os dados práticos necessários à sua correta execução. Neste sentido, ainda que diversos estudos tenham sido desenvolvidos no tema, as características da ZACT formada são dependentes da composição química do material trabalhado, e das condições de execução do corte. Assim, cada caso deve ser avaliado e otimizado

isoladamente. É neste cenário que o presente trabalho está inserido, pois visa caracterizar a ZACT produzida em placas do aço ABNT NBR 6655 GRAU LN 280 submetidas a operações de corte a plasma.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste estudo constitui o aço baixo carbono ligado ao manganês classe ABNT NBR 6655 Grau LN 280. Este material é fornecido comercialmente na forma de placas laminadas a quente. Estas placas possuem

largura e comprimento com dimensões de 2000×4000 mm, e espessuras de 25 e 30 mm. A composição química nominal deste material (fornecida pelo fabricante), e a real determinada pela técnica de (espectroscopia de emissão óptica), são informadas na Tabela 1.

Utilizando o processo de corte a plasma, a partir das placas de aço foram cortadas peças com geometria cilíndrica, conforme esquema mostrado na Figura 1. Os parâmetros adotados para executar o corte PAC, considerando cada espessura de placa, são informados na Tabela 2.

Tabela 1. Composição química (em %wt.) real e nominal do aço ABNT NBR 6655 grau LN280.

Fonte	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	V	Nb	Ti
Real	0,202	1,206	0,019	0,005	0,180	0,011	0,015	0,002	0,001	0,001
Nominal	0,22 <sub>máx</sub>	0,6-1,5	0,03 <sub>máx</sub>	0,025 <sub>máx</sub>	0,4 <sub>máx</sub>	0,03 <sub>máx</sub>	0,60 <sub>máx</sub>	0,15 <sub>máx</sub>	0,05 <sub>máx</sub>	0,05 <sub>máx</sub>

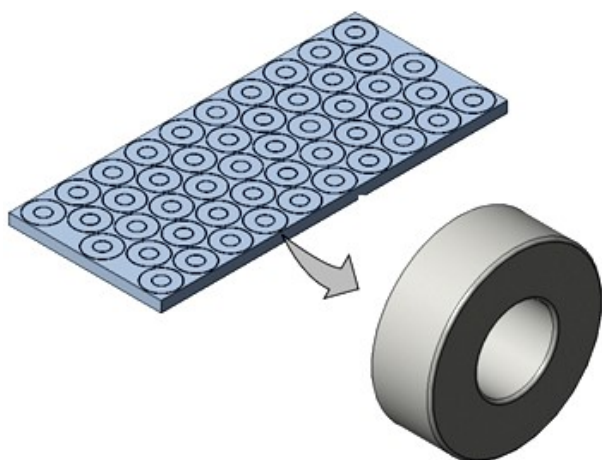


Figura 1. Esquema ilustrando o perfil de corte realizado.

Tabela 2. Condições de realização do corte a plasma.

Variável	Valores	
Espessura da placa	25 mm	30 mm
Máquina/Modelo	Messer/Multitherm 400	
Tensão	158 V	172 V
Corrente	260 A	400 A
Velocidade de corte	1560 mm/min	1320 mm/min
Gás de perfuração	Oxigênio	
Gás de corte	Ar comprimido	
Vazão	8 – 9 Bar	
Altura de corte	2,5 mm	2,2 mm
GAP	3,5 mm	4,8 mm
Potência específica	$2,9 \times 10^9$ W/m <sup>2</sup>	$5,0 \times 10^9$ W/m <sup>2</sup>

De modo a caracterizar a ZACT produzida pelo corte térmico, as seções transversais das buchas foram seccionadas e tiveram a sua microestrutura propriedades mecânicas caracterizadas. A microestrutura da ZACT foi avaliada utilizando um microscópio óptico da marca Zeiss modelo Axio Lab A1, após preparação metalográfica e ataque químico utilizando reagente Nital 5%. A microestrutura da seção transversal de ambas as buchas, na região da ZACT, também foi caracterizada por medida de perfil de tensão residual, utilizando um difratômetro

Shimadzu XRD-7000 (radiação Cr-K $\alpha$  e velocidade de varredura de 1,8 °/min), de acordo com o método ‘Chi’ [9]. De modo a levantar o perfil de tensão residual, a superfície das amostras foi submetida a sucessivas remoções de material por usinagem química utilizando uma solução composta por 50% de ácido nítrico e 50% de água destilada. As medições da microdureza ao longo da seção transversal foram realizadas utilizando um microdurômetro da marca Shimadzu modelo HMU-2.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são mostradas as micrografias da seção transversal da amostra de 25 mm de espessura, junto à aresta de corte do seu diâmetro externo, evidenciando o efeito do aporte térmico produzido pelo processo PAC sobre a microestrutura do material. A micrografia da região nomeada por SÑACT (substrato não afetado pelo calor) revela uma estrutura de grãos equiaxiais típica de placas laminadas a quente, constituída por microestrutura hipoeutetóide característica dos aços de baixa ligada com baixo teor de carbono. Essa microestrutural é formada pelos microconstituintes ferrita poligonal (coloração clara) e perlita (coloração escura). A microestrutura da ZACT é tipicamente constituída por uma região de grãos grosseiros (ZACT-G) próxima a linha de fusão, e uma região de grãos refinados (ZACT-F) situada entre a ZACT-G e o SÑACT. Conforme sabido, o maior tamanho de grão da ZACT-G deve-se à sua proximidade em relação a poça de fusão, e a granulação mais fina da ZACT-F se dá em virtude do resfriamento produzido pelo volume do metal de base. A região da ZACT-F é composta pelos microconstituintes ferrita poligonal, ferrita de contorno de grão e perlita, todos com granulação fina. Nesta região, durante o processo de corte térmico, a temperatura é suficiente para formar a austenita, no entanto o máximo valor alcançado não é suficiente para dissolver completamente a cementita que compõe a perlita, como ocorre na região da ZACT-G. Consequentemente, ao formar grãos ferríticos finos durante a recristalização, o crescimento de grão da austenita é suprimido e a ulterior transformação desta em uma estrutura hipoeutetóide grosseira não ocorre durante o

seu resfriamento. A região da ZACT-G também é constituída por ferrita poligonal, ferrita de contorno de grão e perlita, entretanto com granulação mais grosseira. Cabe destacar que a ZACT-G atinge valores de temperatura acima da crítica – Ac3, o que favorece o crescimento do grão austenítico. Durante o posterior resfriamento, a austenita de granulação grosseira formada irá se decompor em ferrita poligonal, ferrita de contorno de grão e perlita. Por fim, a região da zona fundida (ZF) é composta por ferrita acicular, ferrita de Widmanstätten e, em menor proporção, por ferrita poligonal. De acordo com a literatura, a presença de ferrita acicular está associada a um alto volume de inclusões não metálicas na matriz, sendo esta constituída por agulhas ou placas finas de ferrita que crescem por nucleação intergranular junto as inclusões. Destaca-se que a microestrutura da seção transversal da amostra com 30 mm de espessura apresentou as mesmas características morfológicas e os mesmos microconstituintes.

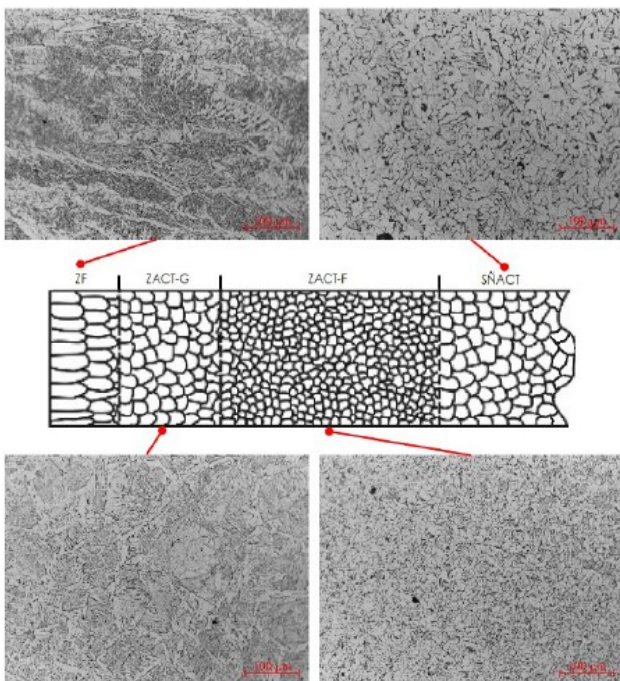


Figura 2 – Micrografia da seção transversal da amostra com 25 mm de espessura após corte a plasma.

Na Figura 3 é ilustrado o perfil de dureza medido na seção transversal de ambas as amostras após o corte a plasma, medido junto à aresta de corte do seu diâmetro externo. Nota-se claramente a distinção dos patamares de dureza segundo as diferentes regiões da borda de corte, mostradas e discutidas anteriormente na Figura 2. É possível identificar claramente o efeito do refino/crescimento de grãos produzido pelo corte térmico, sobre os valores de dureza medidos. Igualmente, é possível verificar com clareza que a dureza em relação à distância da borda exibe valores similares em ambas as amostras. Também, é possível distinguir uma mesma profundidade de endurecimento em ambas as amostras.

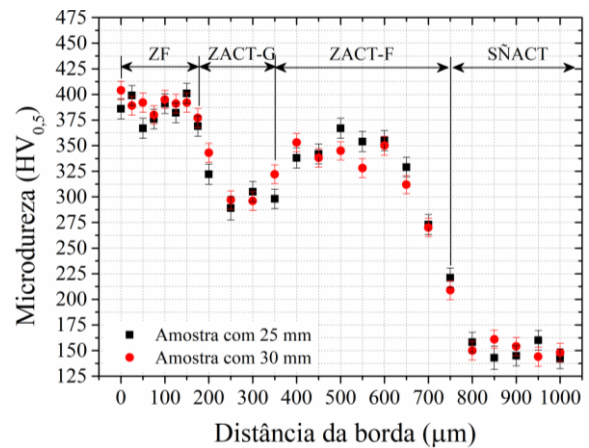


Figura 3 – Perfil de microdureza da seção transversal de ambas as amostras após corte a plasma.

Na Figura 4 é ilustrado a evolução dos valores de tensão residual medidos na seção transversal de ambas as amostras, junto à aresta de corte do seu diâmetro externo. Observa-se que corte a plasma gera, na superfície subjacente à aresta de corte, tensões residuais de compressão. Estas tensões residuais compressivas se estendem até uma distância de, aproximadamente, 550 μm da aresta de corte; reduzindo gradualmente até se tornarem trativas em profundidades maiores, comportamento este esperado quando se tem tensões em equilíbrio, sem ação de forças externas [10].

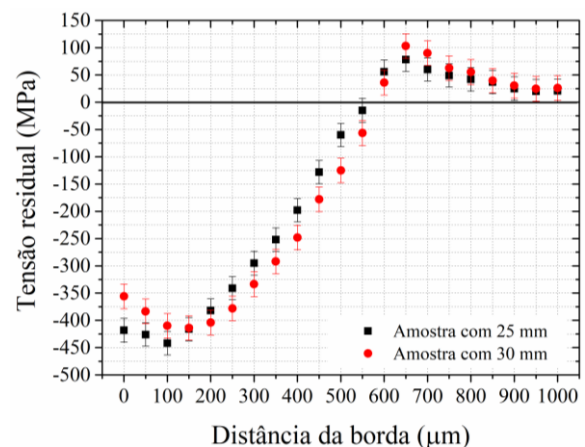


Figura 4 – Evolução da tensão residual ao longo da seção transversal de ambas as amostras após corte a plasma.

Na Figura 5 é mostrada a topografia da superfície resultante do corte a plasma nas regiões da borda superior(a) e inferior (b) de corte da amostra com 25 mm de espessura, junto à aresta de corte do seu diâmetro externo. A superfície superior formada pelo corte é caracterizada por pequenas diferenças de altura (exibe um número maior de picos com menores alturas), na região onde o jato de plasma penetrou no material (Figura 5a). Na região inferior da borda de corte (Figura 5c), a superfície formada é caracterizada por diferenças maiores de altura (exibe um número menor de picos com maiores alturas). Esse comportamento se deve à um aumento na viscosidade do metal fundido na borda de corte inferior, devido à sua

maior oxidação. Isso aumenta a espessura da camada de metal líquido, que, como resultado, adere à superfície que está sendo cortada, promovendo a formação de grandes

irregularidades. Esse mesmo comportamento foi verificado para a amostra com espessura de 30 mm, porém exibindo um menor desvio de forma.

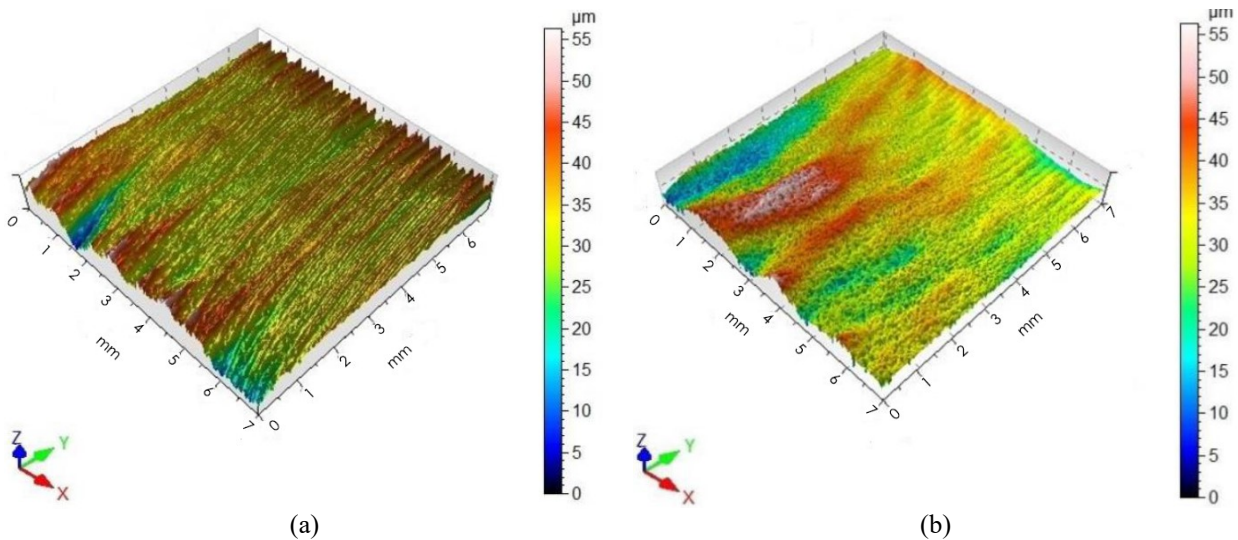


Figura 5 – Topografia da superfície resultante do corte a plasma nas regiões (a) da borda superior e (b) inferior de corte da amostra com 25 mm de espessura, junto à aresta de corte do seu diâmetro externo.

#### 4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- i) A região da ZF é composta por ferrita acicular, ferrita de Widmanstätten e, em menor proporção, por ferrita poligonal;
- ii) As regiões da ZACT com granulação grosseira e fina são constituídas por ferrita poligonal, ferrita de contorno de grão e perlita;
- iii) O perfil de dureza evidencia um plato com valores na região da ZF superior em 276% ao valor do substrato, a ZTA-G superior em 200% e a ZTA-F superior em 233%;
- iv) Os perfis de tensão residual evidenciam a ocorrência de tensões de compressão em uma profundidade de até 550  $\mu\text{m}$  a partir da aresta de corte. Para além desta profundidade, as tensões tornam-se trativas; e,
- v) A topografia nas regiões da borda superior e inferior de corte da bucha são distintas, sendo que a primeira apresenta uma menor rugosidade e desvio de forma em relação à segunda.

#### 5. REFERÊNCIAS

- [1] Andrés, D. *et al.* Characterization of heat affected zones produced by thermal cutting processes by means of Small Punch tests. *Materials Characterization*, v. 119, p. 55-64, 2016.
- [2] Osawa, N. *et al.* Study of heat transfer during piercing process of oxyfuel gas cutting. *Welding in the World*, v. 56(3-4), p. 2-10, 2013.
- [3] Aldazabal, J.; *et al.* Mechanical and Microstructural Features of Plasma Cut Edges in a 15 mm Thick S460M Steel Plate. *Metals*, v. 8, p. 447, 2018.

- [4] Martín-Meizoso, A. *et al.* Resilience and ductility of Oxy-fuel HAZ cut. *Frattura ed Integrità Strutturale*, v. 30, p. 14-22, 2014..
- [5] Nemchinsky, V. Heat transfer in plasma arc cutting. *Handbook of thermal science and engineering*. Springer; 2017. 62 p.
- [6] Wood, W.E. Heat-Affected Zone Studies of Thermally cut Structural Steels (Report FHWA-RD-93-O 15); US Department of Transportation Federal Highway Administration: Washington, DC, USA, 1994.
- [7] Tomas, D.J. Characterisation of Steel Cut Edges for Improved Fatigue Property Data Estimations and Enhanced CAE Durability. Ph.D. Thesis, Swansea University UK, Swansea, UK, 2011.
- [8] Kirkpatrick, I. Variety of cutting processes spoil fabricators for choice. *Welding and Metal Fabrication*, v. 62, p. 11-12, 1994.
- [9] Wollmann, D.; *et al.* Rolling Contact Fatigue Failure Mechanisms of Plasma-Nitrided Ductile Cast Iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 26, p. 2859–2868, 2017.
- [10] GRABARSKI, M.I. Efeito de tensões residuais compressivas na fadiga de contato por rolamento de um ferro fundido nodular com matriz de dureza elevada. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2019.