

# INFLUÊNCIA DO CORTE A GÁS NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO API 5L X70 PROVENIENTE DO RESFRIAMENTO ACELERADO<sup>1</sup>

Cleydson Fernando Gomes Torres<sup>2</sup>  
Túlio Magno Fuzessy de Melo<sup>3</sup>  
Dagoberto Brandão dos Santos<sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho foi desenvolvido visando compreender e melhorar o processo de corte das amostras recebidas e a preparação dos corpos de prova pelo Laboratório de Ensaios Mecânicos da Usiminas. O objetivo foi verificar através de ensaios mecânicos (tração e dureza) e análise metalográfica (zona termicamente afetada – ZTA), a influência do corte a gás na microestrutura e nas propriedades mecânicas do aço API 5L X70 processado via resfriamento acelerado. Foi observado, através dos ensaios realizados, que os parâmetros utilizados atualmente são suficientes para garantir que os resultados de propriedades mecânicas originais do aço em questão não sejam afetados.

**Palavras-chave:** Corte a gás; Resfriamento acelerado; Zona termicamente afetada.

## INFLUENCE OF GAS CUTTING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF API 5L X70 STEEL FROM THE ACCELERATED COOLING PROCESS

### Abstract

This work was conducted to understand and improve the process of cutting the samples received and preparation of test specimens by the Laboratory for Mechanical Testing of Usiminas. The objective was to verify through mechanical tests (tensile and hardness) and metallographic analysis (heat affected zone - HAZ), the influence of gas cutting on microstructure and mechanical properties of steel API 5L X70 processed by accelerated cooling process. It was observed through the tests that the parameters currently used in the laboratory are sufficient to ensure that the results of original mechanical properties of the steel in question are not affected.

**Key words:** Gas cutting; Accelerated cooling; Heat affected zone.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro de Materiais; Mestrando em Metalurgia Física; Laboratório de Ensaios Mecânicos, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Engenheiro Mecânico, Dr. - Ing., Centro de Tecnologia Usiminas, Usiminas; Ipatinga, MG.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, Dr., Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG.

# 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as amostras recebidas da linha de chapas grossas da Usiminas para ensaios mecânicos de liberação são cortadas por máquinas de corte a gás. O corte de corpos de prova é realizado em tamanhos maiores que os exigidos pelas normas para garantir que não ocorra influência do corte a gás nos resultados dos ensaios.

O corte a gás gera uma zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) que, se não for retirada por processos posteriores de preparação dos corpos de prova, pode gerar valores de propriedades mecânicas diferentes daqueles característicos do aço testado.

De acordo com Shinichi, Ichimiya e Akita,<sup>(1)</sup> que estudaram o comportamento da ZTA da solda, similar à ZTA do corte a gás nos aços carbono, as altas temperaturas desse processo tornam a microestrutura da zona termicamente afetada extremamente grossa, alterando, portanto, as propriedades mecânicas do aço. Shin et al.,<sup>(2)</sup> que também estudaram a ZTA da solda no aço API 5L X70, encontraram uma microestrutura composta de bainita, ferrita acicular e outros constituintes, como martensita ou martensita-austenita (MA).

O intuito deste trabalho é avaliar a influência do corte a gás nas propriedades mecânicas do aço API 5L X70 variando o tamanho dos corpos de prova, visando a definição das dimensões que garantam a obtenção de propriedades não afetadas pelo corte. Para auxiliar nesta verificação, foram realizados ensaios de tração e dureza, além da análise da microestrutura da área afetada pelo corte a gás.

A escolha de um aço proveniente do resfriamento acelerado se deu em função do processo ser novo para a Usiminas e gerar microestruturas diferentes daquelas usualmente encontradas no processo de laminação convencional.

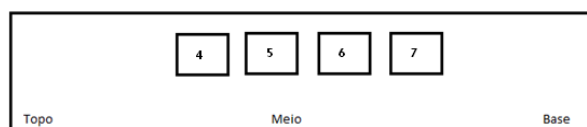
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Seleção das Amostras

Para este estudo, foram utilizadas amostras retiradas de chapas grossas de aço API 5L X70, produzidas na Usina de Ipatinga da Usiminas, processadas por laminação controlada seguida de resfriamento acelerado. Foram selecionadas chapas em duas espessuras (12,70 mm e 38,10 mm), representativas da faixa dimensional disponível para esse aço. Os sistemas de ligas para as duas espessuras foram diferentes, o material de 12,70 mm é Nb-V-Ti (Ceq = 0,44%) e o de 38,10 mm é Nb-Cu-Ni-Mo (Ceq = 0,44%).

As amostras foram retiradas na posição central do comprimento das chapas e a ¼ da largura, conforme mostrado na figura 1. Foi utilizada a seguinte identificação para as amostras: 4, para ensaios de dureza e análises metalográficas, 5, 6 e 7 para ensaios de tração.

O corte dos corpos de prova nas amostras foi realizado no Laboratório de Testes Mecânicos da Usiminas, utilizando uma máquina da marca ESAB, dotada de seis maçaricos automáticos controlados por comando numérico computadorizado - CNC.

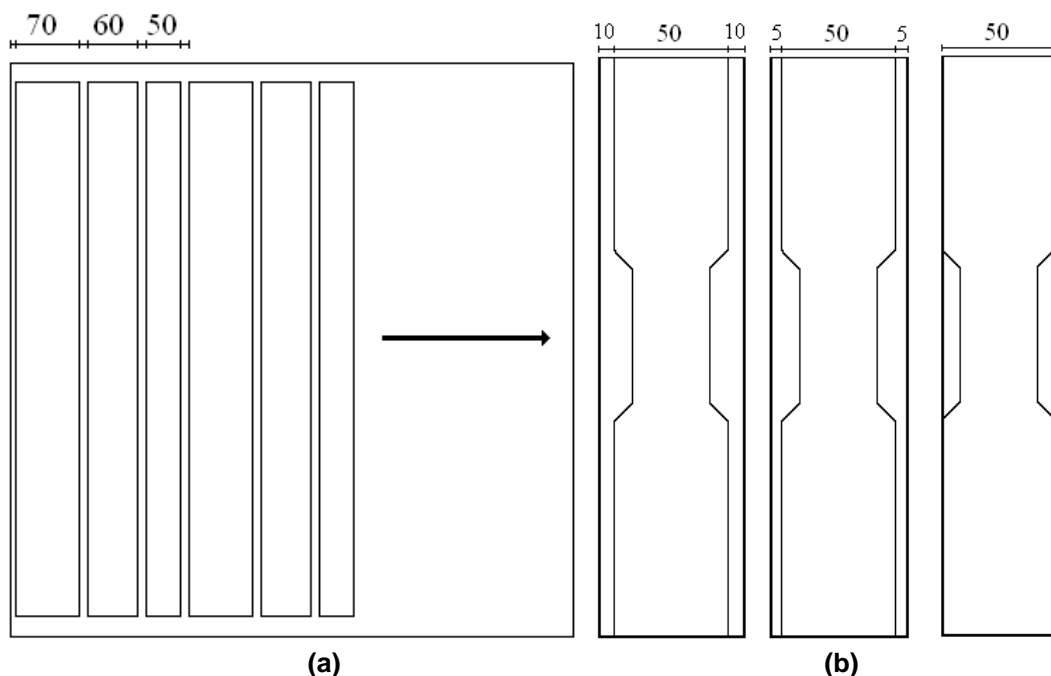


**Figura 1** – Desenho esquemático de uma chapa e as posições de retiradas das amostras.

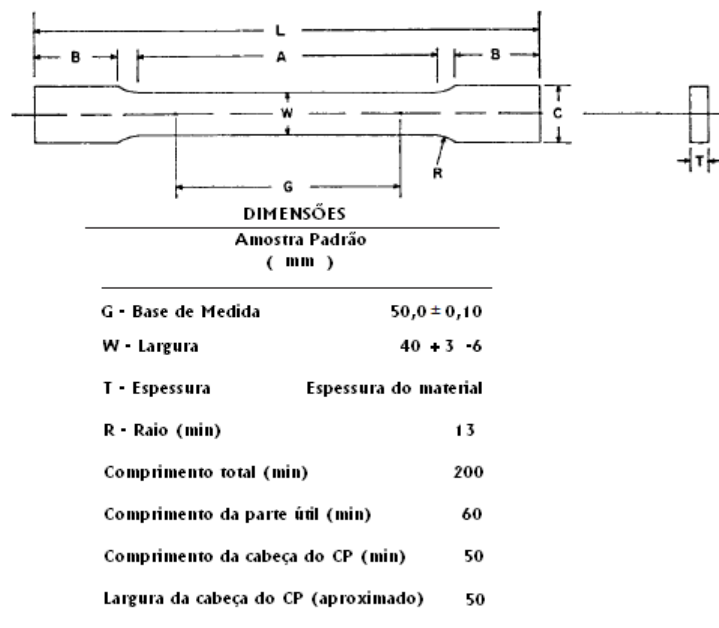
## 2.2 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados conforme norma ASTM A 370<sup>(3)</sup>, com velocidade constante (0,80 kgf/mm<sup>2</sup>/s), usando máquina Instron com capacidade de 1200 kN.

Das amostras de chapa foram retirados, na máquina de corte a gás, pares de corpos de prova (CPs) de tração com as seguintes larguras: 70 mm, 60 mm e 50 mm. A Figura 2a apresenta um desenho esquemático destes cortes. Como foram retiradas três amostras (5, 6 e 7 na Figura 1) de cada chapa, foram ensaiados seis corpos de prova para cada largura, sempre com o comprimento alinhado com a direção transversal de laminação. Após o corte, foi realizada a usinagem final dos corpos de prova de tração, com as dimensões definidas na norma, mostradas na Figura 3. Como a largura final da cabeça dos corpos de prova (C, na Figura 3) deve ser igual a 50 mm, foi necessário reduzir a largura para os corpos de prova cortados com 60 mm e 70 mm e, em seguida, usinar a parte útil dos CPs. A Figura 2b mostra a quantidade de material descartado de cada CP.



**Figura 2** – Desenho esquemático da retirada dos CPs de tração nas amostras (a) e a quantidade de material descartado de cada CP (b). A seta indica o sentido de laminação. Os CPs foram cortados a uma distância de 10 mm um do outro.

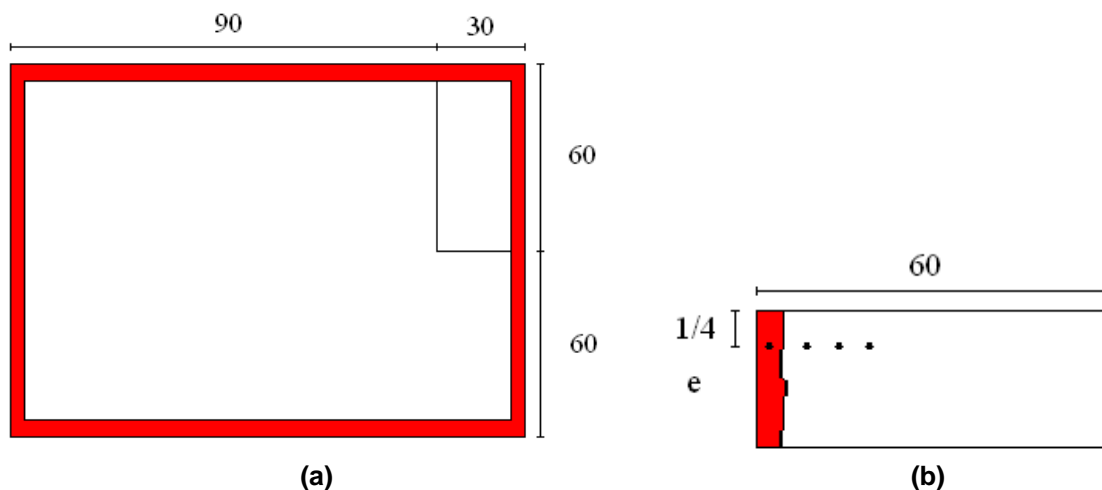


**Figura 3** – Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração.<sup>(3)</sup>

### 2.3 Análise Metalográfica e Ensaio de Dureza

As amostras retiradas para o ensaio de dureza Vickers foram cortadas a gás com as dimensões de 120 X 120 mm. Depois foram retirados CPs nas dimensões de 30 mm de largura e 60 mm de comprimento, conforme Figura 4a. A parte representada em vermelho (destacado nas bordas) é o local afetado pelo corte a gás (ZTA).

A análise metalográfica foi realizada com o objetivo de caracterizar a microestrutura e as dimensões da zona termicamente afetada (ZTA) pelo corte a gás.



**Figura 4** – Desenho esquemático do corpo de prova para metalografia e dureza na vista superior (a) e no sentido da espessura (b). A região termicamente afetada pelo corte é representada pela área escura nas bordas do CP.

Para as análises metalográficas, foi utilizado um microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX41M, com aumentos de até 1000 X.

As medições de dureza Vickers ao longo do comprimento da ZTA, a um quarto da espessura da amostra, foram realizadas usando máquina FUTURE-TECH, com carga de 10 kgf, conforme norma ABNT NBR NM ISO 6507-1.<sup>(4)</sup> Foram realizadas

quatro medidas em cada amostra a uma distância de aproximadamente 3 mm uma da outra, conforme a Figura 4b.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Propriedades Mecânicas

Os resultados de limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (ALO) são apresentados na Tabela 1. A identificação dos corpos de prova ensaiados segue a seguinte lógica:

Espessura da amostra = 12,70 mm (código M) e 38,1 mm (código U); posição da amostra na chapa = 5, 6 ou 7; posição do CP na amostra = 1 ou 2; largura do CP = 50 mm, 60 mm ou 70 mm.

Nota-se no quadro 1 que, de maneira geral, as propriedades mecânicas variaram pouco com a largura da amostra.

**Tabela 1** – Resultados dos ensaios de tração

Amostra	Ident	LE (MPa)	LR (MPa)	Alo (%)	Amostra	Ident	LE (MPa)	LR (MPa)	Alo (%)
I0146668	M7.1-70	529	606	41,7	I0146692	U7.1-70	607	727	55,5
I0146677	M7.2-70	534	604	39,8	I0146701	U7.2-70	607	726	56,5
I0146669	M6.1-70	524	604	39,8	I0146693	U6.1-70	614	728	55,5
I0146678	M6.2-70	525	603	40,7	I0146702	U6.2-70	607	725	53,5
I0146670	M5.1-70	532	606	40,7	I0146694	U5.1-70	607	722	57,5
I0146679	M5.2-70	526	605	39,8	I0146703	U5.2-70	607	725	55,5
Média		528	605	40,42	Média		608	726	55,67
Desvio		4,03	1,21	0,77	Desvio		2,86	2,07	1,33
I0146671	M7.1-60	528	606	40,7	I0146695	U7.1-60	605	728	55,5
I0146680	M7.2-60	524	605	41,7	I0146704	U7.2-60	611	729	57,5
I0146672	M6.1-60	527	604	37,8	I0146696	U6.1-60	609	728	54,5
I0146681	M6.2-60	529	606	38,8	I0146705	U6.2-60	604	724	55,5
I0146673	M5.1-60	531	603	41,7	I0146697	U5.1-60	603	722	54,5
I0146682	M5.2-60	529	609	39,8	I0146706	U5.2-60	606	726	56,5
Média		528	606	40,08	Média		606	726	55,67
Desvio		2,37	2,07	1,58	Desvio		3,08	2,71	1,17
I0146674	M7.1-50	526	605	40,7	I0146698	U7.1-50	608	726	52,6
I0146683	M7.2-50	527	606	40,7	I0146707	U7.2-50	614	723	55,5
I0146675	M6.1-50	524	606	39,8	I0146699	U6.1-50	606	729	55,5
I0146684	M6.2-50	525	608	40,7	I0146708	U6.2-50	605	721	57,4
I0146676	M5.1-50	528	606	38,8	I0146700	U5.1-50	602	723	55,5
I0146685	M5.2-50	527	609	39,8	I0146709	U5.2-50	601	723	55,5
Média		526	607	40,08	Média		606	724	55,33
Desvio		1,47	1,51	0,77	Desvio		4,69	2,86	1,54

Seguem abaixo alguns comentários referentes aos resultados de tração do material com espessura de 12,70 mm.

A maior variação entre os valores de limite de escoamento foi de 10 MPa (M7.2). Esta diferença pode ser considerada normal, levando-se em conta variáveis tais como a incerteza de extensômetros, paquímetros, micrômetros e da própria célula de carga da máquina. Variações de até 11 MPa foram relatadas na literatura, no caso de aços para a fabricação de plataformas *offshore*.<sup>(5)</sup>

A variação no LR foi menor que no LE, somente 4 MPa (M5.2). Plaut et al.<sup>(6)</sup> encontraram variações de até 18 MPa para o LR de um aço API 5L X70 produzido por laminação controlada. Uma vez que o cálculo do limite de resistência leva em

conta somente a carga máxima, informada pela célula de carga da máquina e as dimensões do corpo de prova, os erros de determinação dessa propriedade tendem a ser menores que do LE.

A maior diferença nos valores de alongamento obtidos foi de 2,90% (M5.1), correspondente a 1,47 mm na base de medida utilizada (50,80 mm). Essa variação pode ser considerada pequena, visto que a medição é realizada manualmente sobre as metades do CP rompido, através de uma escala milimétrica. Diferenças de até 3% foram encontradas por Plaut et al.<sup>(6)</sup>

Seguem, a seguir, alguns comentários referentes aos resultados de tração do material com espessura de 38,10 mm.

A maior variação no LE foi de 8 MPa para (U6.1). A variação no LR (6 MPa – U7.2) foi um pouco maior do que aquela da amostra mais fina. Ainda assim, esse valor pode ser considerado baixo em função das incertezas de medição inerentes ao ensaio citados anteriormente.

A variação nos resultados de alongamento (3,90% ou 1,98 mm – U6.2) foi um pouco maior que aquela registrada para a amostra mais fina. Esse valor também pode ser considerado normal, da mesma forma que no caso anterior.

Os resultados dos ensaios de tração foram comparados utilizando-se a ferramenta estatística ANOVA<sup>(7)</sup> (Análise de Variância – fator único). Nos casos em que  $F_{calc} > F_{crit}$  pode-se inferir que as amostras são oriundas de populações diferentes, indicando um efeito estatisticamente significativo da largura do CP sobre a propriedade analisada (LE, LR ou ALO). Ao contrário, se  $F_{calc} < F_{crit}$ , as variações observadas podem ser explicadas em função somente da variabilidade inerente ao ensaio. O nível de confiança utilizado na análise foi de 95%.

Como se vê na Tabela 2, a análise estatística indicou que os resultados de LE, LR e ALO obtidos, para as espessuras avaliadas, podem ser considerados pertencentes à mesma população. Isso significa que a largura da amostra cortada a gás anterior à usinagem do corpo de prova (50 mm, 60 mm ou 70 mm) não afetou os resultados de tração do material ensaiado neste estudo.

**Tabela 21 – Resultados da ANOVA.**

Anova			
Espessura		$F_{crit}$	$F_{calc}$
12,7	LE	3,682	1,019
	LR		2,261
	AL		0,181
38,1	LE		0,618
	LR		0,941
	AL		0,121

### 3.2 Microestrutura e Dureza

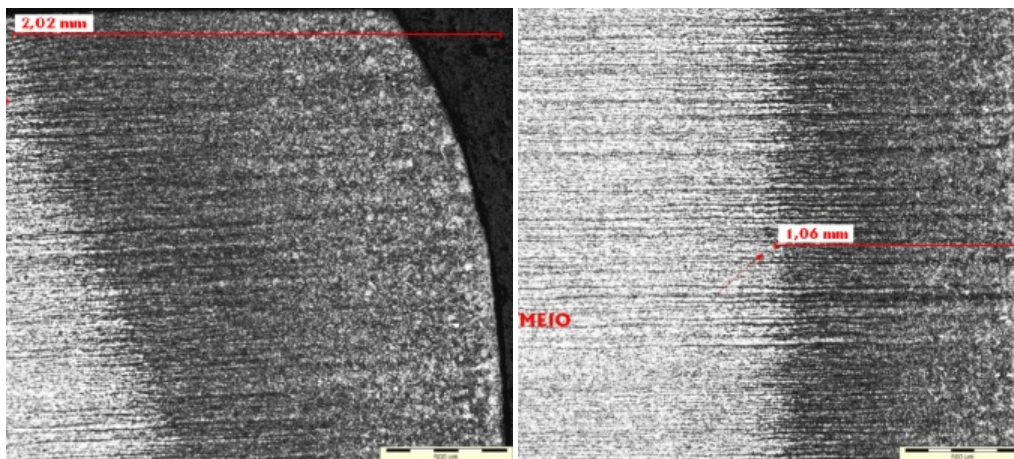
O aspecto microestrutural, visto ao microscópio óptico, da região próxima à borda de corte das amostras avaliadas neste estudo, após ataque com reativo nital 3%, é apresentado na Figura 5. São mostradas a região próxima à superfície superior (entrada do corte) e também a parte central da espessura das amostras. Em cada uma dessas regiões, mediu-se a extensão da zona termicamente afetada pelo corte a gás (ZTA), como indicado na figura 5. Os valores obtidos, apresentados na Tabela 3, indicam que a ZTA na superfície superior das amostras (entrada do corte),

onde a ponta do maçarico fica um tempo maior aquecendo o material, é mais extensa que no meio da espessura.

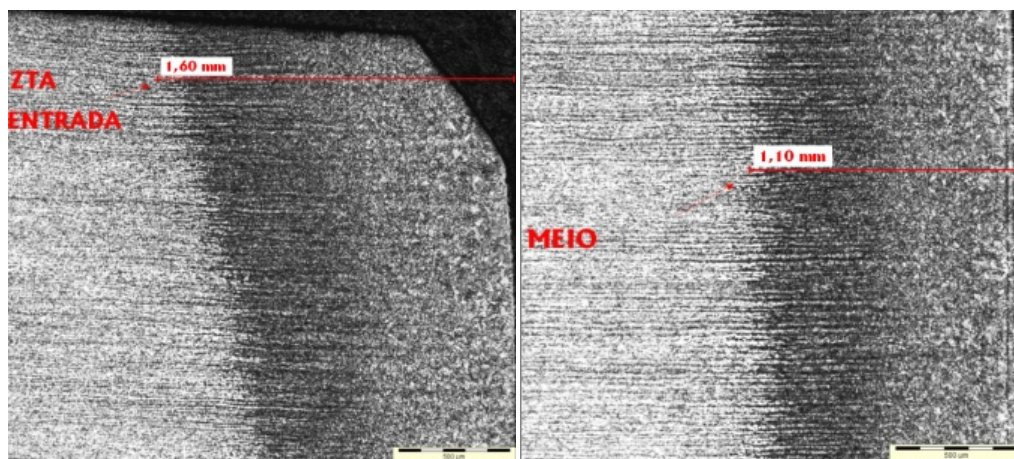
A Tabela 3 também mostra que o material com espessura de 12,70 mm (CPs M4.2, M4.4 e M4.6) apresentou uma área termicamente afetada pelo corte menor que a do material com espessura de 38,10 mm (CPs U4.2, U4.4 e U4.6). O comprimento máximo foi de 2,02 mm para espessura de 12,7 mm e 2,50 mm para a espessura de 38,10 mm. Valores de até 2,10 mm foram observados por Albuquerque et al.<sup>(8)</sup> para extensão da ZTA na soldagem por processo automatizado de um aço API 5L X80 de 19 mm de espessura. No caso da soldagem manual, os autores encontraram valores maiores, de até 6,60 mm. Nessa tabela, a identificação dos corpos de prova ensaiados segue a seguinte lógica:

Espessura da amostra = 12,70 (M) e 38,10 (U); Amostra (posição na chapa) = 4; Posição do CP na amostra = 2, 4 ou 6.

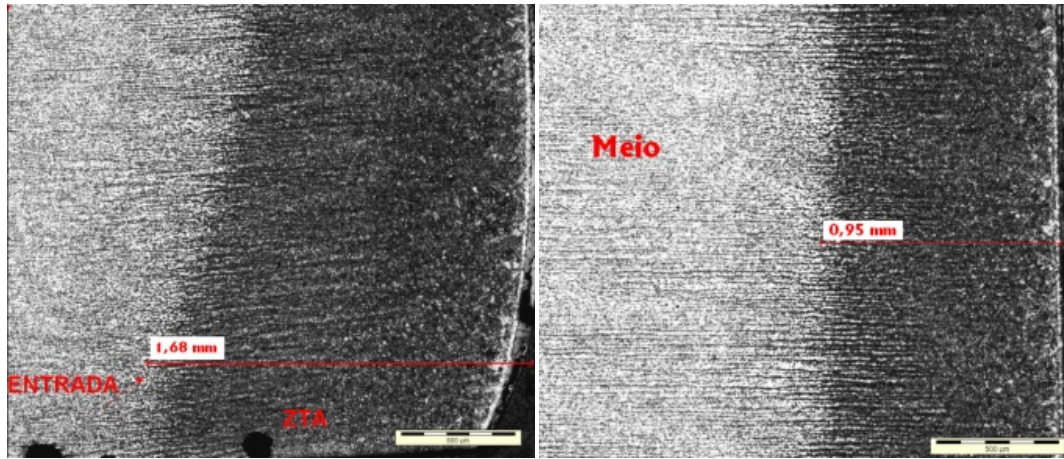
As diferenças na extensão da ZTA para as duas espessuras avaliadas podem estar ligadas à menor velocidade de corte utilizada no material mais grosso, resultando em um maior tempo à temperatura elevada.



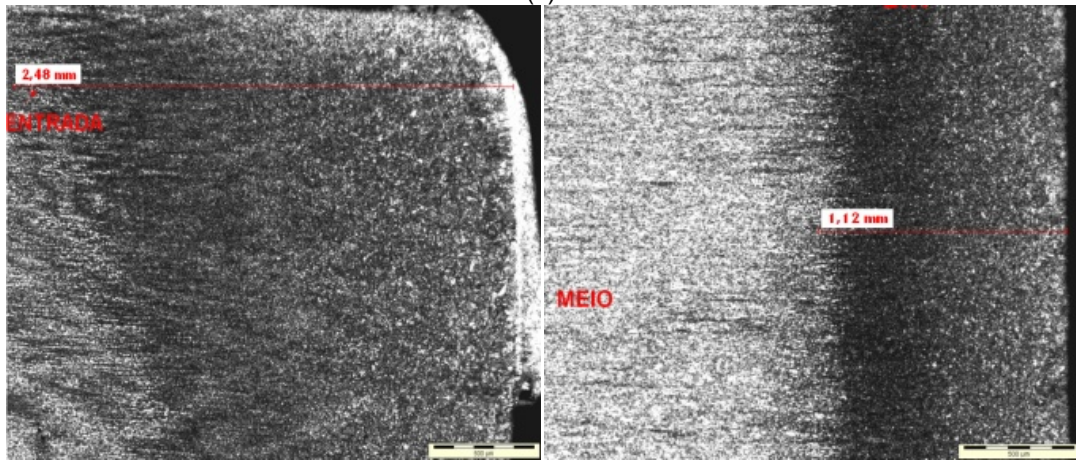
(a)



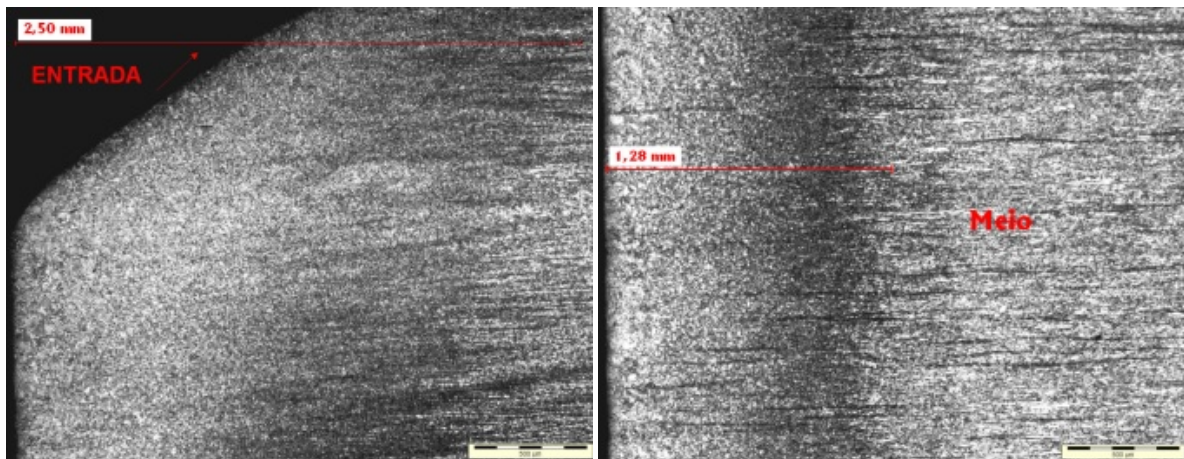
(b)



(c)

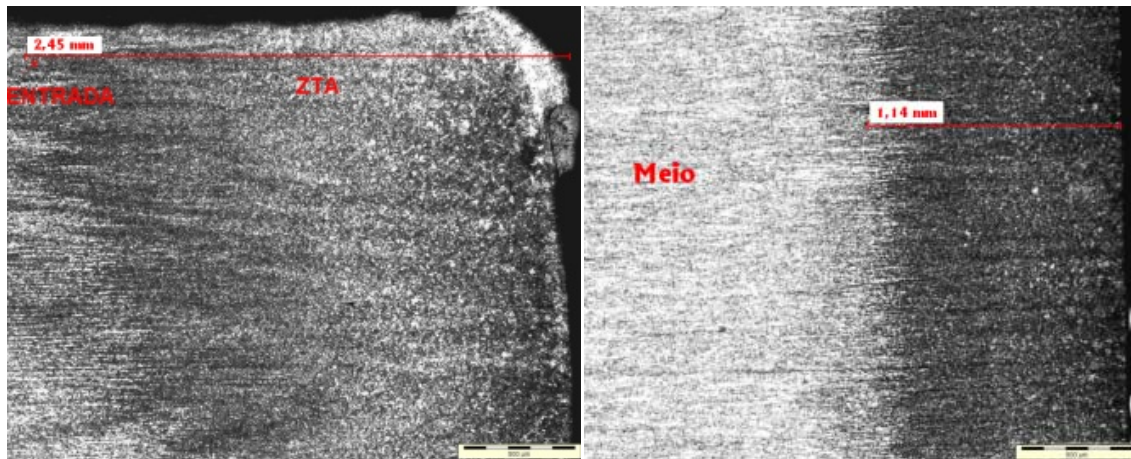


(d)



(e)





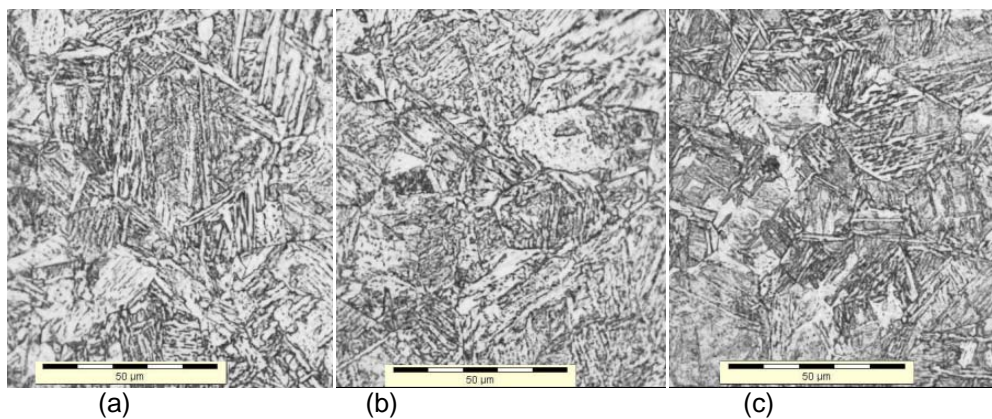
(f)

**Figura 5** – Aspecto microestrutural da entrada e do meio do corte nos corpos de prova avaliados. Os corpos de prova de 12,70 mm de espessura são as letras (a), (b) e (c) e os corpos de prova de 38,10 mm são as letras (d), (e) e (f).

**Tabela 3** – Extensão da região termicamente afetada pelo corte a gás (ZTA)

CP	Posição	ZTA (mm)	CP	Posição	ZTA (mm)
M4.2	Entrada	2,02	U4.2	Entrada	2,48
	Meio	1,06		Meio	1,12
M4.4	Entrada	1,6	U4.4	Entrada	2,5
	Meio	1,1		Meio	1,28
M4.6	Entrada	1,68	U4.6	Entrada	2,45
	Meio	0,95		Meio	1,14
Média	Entrada	1,77	Média	Entrada	2,48
	Meio	1,04		Meio	1,18

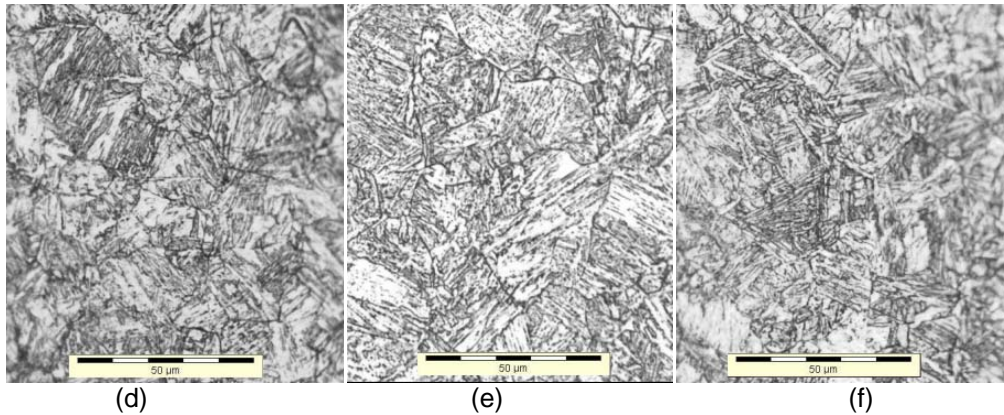
Detalhes da microestrutura das ZTAs apresentadas na Figura 5, vistas sob maior aumento nas proximidades da borda de corte, são mostradas na Figura 6. Verifica-se que em todos os casos a microestrutura é formada em sua maioria por bainita/martensita.



(a)

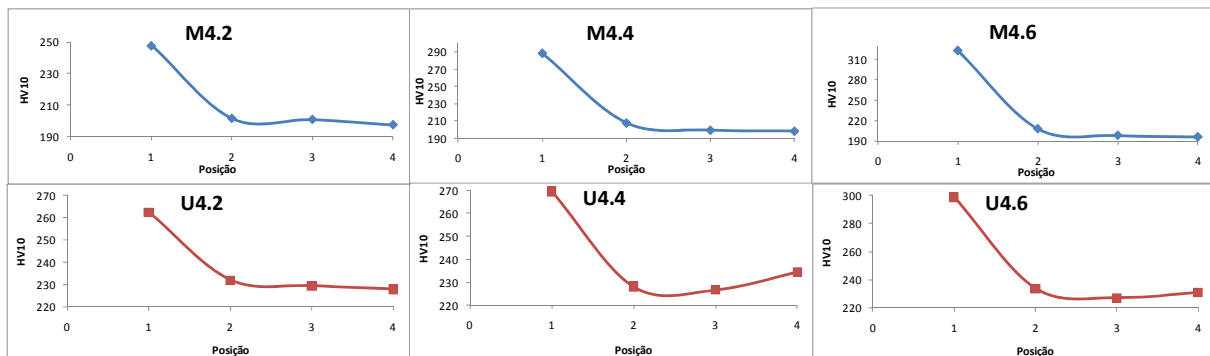
(b)

(c)



**Figura 6** – Micrografias das áreas afetadas pelo corte a gás. Os corpos de prova de 12,70 mm de espessura são as letras (a), (b) e (c) e os corpos de prova de 38,10 mm são as letras (d), (e) e (f).

Os perfis de dureza levantados ao longo da ZTA dos CPs confirmam a presença de bainita/martensita, como pode ser visto na Figura 7. Em todos os casos, a dureza é alta próximo à borda de corte, caindo para um valor aproximadamente constante nos outros três pontos de medição.



**Figura 7** – Resultado do ensaio de dureza para 3 corpos de prova com espessura de 12,70 mm (M) e mais 3 com espessura de 38,10 mm (U).

A diferença entre a dureza na ZTA e fora dela ficou em torno de 30% para os CP's com 12,70 mm de espessura e 17% para os CP's mais espessos (38,10 mm de espessura). Resultados similares foram obtidos por Rossini et al.<sup>(9)</sup> em um aço de baixo carbono com 10 mm de espessura, cuja ZTA apresentou dureza 46,90% mais alta em relação ao material de base.

Para o processo de preparação do aço para a realização dos ensaios de tração é necessário retirar certa quantidade de material na usinagem. Esta quantidade de material vai depender da largura de CP de prova. Se o material for cortado a gás com largura de 50 mm, igual aquela definida pela norma ASTM A 370,<sup>(4)</sup> somente a parte útil do CP terá que ser usinada até uma largura entre 34 mm e 43 mm, como mostrado na Figura 3.

Para que essa largura (dimensão W indicado na FigURA 3) fique igual a 43 mm, que é o limite superior aceito pela norma, deverão ser usinados 3,50 mm em cada uma de suas laterais. De acordo com as dimensões mostradas na Tabela 3, essa usinagem já será suficiente para garantir que toda a ZTA seja eliminada, não restando nenhum vestígio na área útil final do CP. Portanto, para garantir que o ensaio não será realizado na área afetada pelo corte a gás, é necessário que esta distância seja no mínimo de 2,50 mm, o que já é praticado atualmente no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Usiminas.

## 4 CONCLUSÕES

Após as realizações dos ensaios de tração, dureza e análises metalográficas chegou-se as seguintes conclusões:

- Os resultados de tração, para as duas espessuras estudadas, não são afetados pela largura do corte do corpo de prova, cortado no corte a gás, para a faixa avaliada neste trabalho (50 mm, 60 mm ou 70 mm). As variações foram pequenas e os resultados foram considerados iguais pela ferramenta estatística ANOVA. Isto porque a parte afetada pelo corte é retirada no processo de preparação do corpo de prova;
- O maior comprimento de ZTA encontrada foi de 2,50 mm para amostra de 38,10 mm e 2,20 mm para a espessura de 12,70 mm. Portanto, para a realização de ensaios neste material, recomenda-se uma distância de pelo menos 2,50 mm da borda do corpo de prova, para ambas as espessuras, para garantir que o resultado de dureza encontrado não tenha influência da área afetada pelo corte.
- Através das análises metalográficas foi possível identificar a ZTA e os constituintes existentes. Em todas as amostras das duas espessuras foi encontrada uma microestrutura típica de bainita/martensita na borda do corpo de prova afetada pelo corte. Isto explica o aumento da dureza no primeiro ponto avaliado. A zona afetada pelo corte foi maior no material de 38,10 mm de espessura devido à velocidade de corte do maçarico ser menor para esta espessura.

## REFERÊNCIAS

- 1 SHINICHI, S. ICHIMIYA, K. AKITA, T. High Tensile Strength Steel Plates with Excellent HAZ Toughness for Shipbuilding – JFE EWEL Technology for Excellent Quality in HAZ of High Heat Input Welded Joints. JFE Technical Report nº 5, pp. 24 – 29, 2005.
- 2 SHIN, S. Y., OH, K., KANG, K. B., LEE, S. Effects of Complex Oxides on Charpy Impact Properties of Heat Affect Zones of two API X70 Linepipe Steels. ISIJ International, Vol. 49, p 1191-1199, 2009.
- 3 ASTM A 370. Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. pp. 5. 2011.
- 4 ABNT NBR NM ISO 6507-1. Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers - Parte 1: Método de ensaio. 2008.
- 5 SILVA, R. F. Caracterização da Zona Termicamente Afetada de Aço Produzido Via Resfriamento Acelerado. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- 6 PLAUT, R. L., Gorni, A. A., Nakashima, J. T., Pereira, M. M., Silveira, J. H. D. Estudo das Propriedades Mecânicas do Aço API X70 Produzidos Por Laminação Controlada. Tecnol. Metal. Mater., São Paulo, v. 6, n. 1, p. 7-12, 2009.
- 7 TRIOLA, M. F. Introdução à Estatística. Ed. LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. RJ, 2005.
- 8 Albuquerque, S. F., Silva, R. S., Maciel, T. M., Almeida, D. M., Bracarense, A. Q. Estudo do comportamento do aço API 5L X80 quando submetido à soldagem por processo automatizado. Soldag. Insp. vol. 17 nº 2. São Paulo, 2012.
- 9 Rossini, F. R., Santos, C. A., Vilar, R. M. C. S., Lerard, M. C. F. Solda em Chapas Grossas de Aço Baixo Carbono Utilizando Laser de CO<sub>2</sub>. Revista Metalurgia e Materiais, v. 58, nº 527, 2002.