

## INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO TEMPERATURA DE ACABAMENTO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO ULTRA-BAIXO CARBONO

Marcelo dos Santos Pereira\* e Paulo Roberto Mei\*\*

\* Departamento de Materiais e Tecnologia, Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, 12500-000, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil  
e-mail: marcelop@feg.unesp.br

\*\* Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade de Campinas - UNICAMP, Campus Universitário Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas, Brasil  
e-mail: pmei@fem.unicamp.br

### RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é o de estabelecer um claro entendimento dos efeitos da temperatura de acabamento sobre as propriedades mecânicas de um aço ultra-baixo carbono com interstícios livres (interstitial-free steels). O material, produzido pela AÇOMINAS, contendo aproximadamente 40ppm de carbono, foi laminado em escala laboratorial, sendo utilizadas diferentes temperaturas de acabamento - 900°C, 850°C e 800°C. As propriedades mecânicas foram determinadas através de ensaios de tração, e o alongamento total e os valores do coeficiente de anisotropia foram examinados em três direções, ou seja 0°, 45° e 90° em relação a direção de laminação. Os resultados finais mostraram a influência da temperatura de acabamento sobre as propriedades mecânicas, especialmente sobre o alongamento total e o coeficiente de anisotropia ( $r$ ), e a possibilidade de sucesso na aplicação deste material em componentes automotivas, onde um alto grau de conformabilidade é requerido.

### ABSTRACT

The aim of this work is to understand the effects of finishing temperature on the mechanical properties in a interstitial-free ultra-low carbon. The material, produced by AÇOMINAS, with 40ppm of carbon, was hot and cold-rolled in a laboratorial scale, and three different finishing temperatures - 900°C, 850°C e 800°C - were being used. The mechanical properties were determined by tensile tests and the total elongation and the Lankford value ( $\bar{r}$ ) were examined in three directions (0°, 45° e 90°) in relation of rolled direction. The final results showed the finishing temperature influence on the mechanical properties, mainly on the total elongation and the Lankford value ( $\bar{r}$ ), and the successful possibility of application of this material in automotive components, where a high level of deep-drawability is required.



## INTRODUÇÃO

O grande número de artigos, publicados atualmente, sobre o tema aços ultra-baixo carbono livre de intersticiais ou aços IF (Interstitial-Free) é indicativo do interesse mundial na pesquisa e desenvolvimento deste material. No final da década passada, GUPTA *et al.* [1] relataram o pensamento de engenheiros de uma grande indústria automobilística dos Estados Unidos, que na época já afirmavam: “O uso de aços ultra-baixo carbono livre de intersticiais, ao invés de aços de baixo carbono (0,03% a 0,06%), elimina essencialmente toda quebra nas operações de estampagens, além de proporcionar benefícios adicionais como aumento na produtividade e qualidade superior nas partes estampadas”.

Os aços ultra-baixo carbono livre de intersticiais são assim denominados por possuírem elementos intersticiais, como o carbono e o nitrogênio, em teores muito baixos, menores que 50 e 30 ppm respectivamente, estabilizados por elementos microligantes, como o titânio e o nióbio, fortes formadores de carbonetos e nitretos, que removem os elementos intersticiais presentes em solução sólida no material. Os teores muito reduzidos de carbono e nitrogênio somados a adição de alumínio, nióbio e titânio, como estabilizadores, resultam no desenvolvimento de uma textura de recristalização {111} [2,3] altamente favorável a operações de conformação, como a estampagem profunda.

Nos últimos anos, a produção em escala comercial dos aços IF apresentou um franco crescimento. A produção da Nippon Steel mais do que duplicou no período de 1986 a 1992 [4], apresentando uma variação positiva de 115%. No ano de 1990, todos os produtores de aços japoneses manufaturaram uma quantidade total de mais de três milhões de toneladas de aços IF [3], onde somente a Kawasaki Steel atingiu a marca de dois milhões de toneladas/ano [5]. Neste mesmo ano, a indústria automobilística mundial consumiu mais de 10 milhões de toneladas de aços IF [6]. Na Europa e América do Norte a produção de aços IF também se desenvolve em ritmo acelerado. Dados da Thyssen Stahl AG [7] mostram um crescimento, no período de 1983 a 1990, de quase quatrocentas mil toneladas. Além dos grandes centros siderúrgicos, a produção comercial dos aços IF já foi iniciada na Coreia do Sul, e seu desenvolvimento científico e tecnológico atinge outros países, entre eles o Brasil [8].

O efeito da temperatura de acabamento em aços TI-IF tem sido estudada através de inúmeros autores [1,9-12]. As investigações realizadas demonstram que a redução da temperatura de acabamento é prejudicial as propriedades de estampagem em aços IF, quando a laminação de acabamento é feita inteiramente na região austenítica. Contudo, grandes divergências ocorrem quando a laminação de acabamento é parcialmente realizada na região de ferrita + austenita e/ou na região ferrítica.

Estas divergências geraram três diferentes tipos de afirmações para o entendimento da influência da temperatura de acabamento sobre as propriedades mecânicas finais, em especial do coeficiente de anisotropia médio dos aços IF. A primeira afirmação feita por GUPTA *et al.* [1], MATSUMOTO *et al.* [10] e YODA *et al.* [13] demonstrou a ocorrência de um pico ou um máximo nos valores de  $\bar{r}$  em função de variações na temperatura de acabamento. Este máximo localiza-se muito próximo ou levemente abaixo de  $A_{r3}$ . A segunda afirmação mostrou que a estampabilidade é progressivamente reduzida com a diminuição da temperatura de acabamento e foi demonstrada por SATOH *et al.* [9,14]. A terceira afirmação, de forma inversa a afirmação anterior, mostrou uma elevação das propriedades de estampabilidade com

a diminuição da temperatura de acabamento e pode ser encontrada em estudos realizados por KWON *et al.* [15], HASHIMOTO *et al.* [16] e KASHIMA *et al.* [17].

Neste trabalho é estabelecida uma correlação entre a temperatura de acabamento e as propriedades mecânicas finais do aço, em especial do coeficiente de anisotropia médio e o alongamento. Conseqüentemente, busca-se um melhor entendimento do processamento termomecânico dos aços ultra-baixo carbono livres de intersticiais e a possibilidade de aplicação deste material em componentes produzidos por estampagem extra-profunda.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho foi produzido pela AÇOMINAS S.A.. Trata-se de um aço ultra-baixo carbono livre de intersticiais produzido comercialmente pela siderúrgica, que tem como principais e potenciais consumidores deste material as indústrias automobilísticas. A análise química apresentou os resultados mostrados na tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço ultra-baixo carbono livre de intersticiais.

Tipo de Aço	Composição Química (% em peso)								
	C	Mn	S	Si	P	Al	Ti	N	Nb
UBC-IF	0,004	0,200	0,015	0,040	0,012	0,040	0,066	0,002	-

O processamento termomecânico foi realizado no Laboratório de Tratamentos Termomecânicos do Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica de Campinas/UNICAMP (LTT-DEMA/UNICAMP) e no Laboratório de Tratamentos Térmicos da Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá/UNESP (LTT-FE-G/UNESP), e consistiu basicamente das seguintes etapas:

- preparação dos corpos de prova;
- reaquecimento dos corpos de prova;
- laminação a quente;
- preparação de chapas para simulação do bobinamento e laminação a frio;
- simulação de bobinamento;
- laminação a frio e
- recozimento contínuo.

Ao final, foram geradas três condições de processamento, em função da aplicação de três temperaturas diferentes de acabamento, identificadas na tabela 2.

Tabela 2. Condições geradas no processamento termomecânico.

Condição	Temperatura de Reaquecimento (°C)	Temperatura de Acabamento (°C)	Temperatura de Bobinamento (°C)	Temperatura de Recozimento (°C)
1	1050	900	700	850
2	1050	850	700	850
3	1050	800	700	850

Na laminação a quente, as reduções entre cada passe foram dimensionadas em função da potência do laminador. Nesta etapa buscou-se trabalhar com o mínimo de passes possível, aumentando a quantidade de deformação a um máximo. Em geral, a quantidade de deformação entre cada passe esteve abaixo das laminações realizadas industrialmente. A escala de passes aplicados na laminação a quente é dada na tabela 3. Ao final atingiu-se um total de 74,6% de redução, ou seja diminuição na espessura do CDP de 25mm para 6,34mm.

Tabela 3. Escala de passes aplicados na laminação a quente.

Número do Passe	Espessura Inicial (mm)	Espessura Final (mm)	Redução (mm)	Redução (%)	Temperatura (°C)
1	25,0	19,0	6,0	24,0	1000
2	19,0	15,5	3,5	18,4	980
3	15,5	12,5	3,0	19,4	960
4	12,5	10,0	2,5	20,0	940
5	10,0	8,0	2,0	20,0	920
6	8,0	6,3	1,7	20,8	900/850/800

Durante o processo de laminação a frio as chapas sofreram uma redução de 80%, ou seja a espessura inicial de 6.34mm foi diminuída para uma espessura final de 1.27mm. Um total de quinze passes foram aplicados em cada corpo de prova, para que a redução de 80% fosse atingida.

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM E8M -95a, que rege sobre os ensaios de tração para materiais metálicos a temperatura ambiente. O equipamento utilizado foi uma máquina de tração MTS, modelo 810.23M, servohidráulica, com célula de carga com capacidade de 10 kN. A velocidade do deslocamento do cabeçote foi de 0,5mm/min, com aquisição de pontos - carga e deformação - em intervalos de dois segundos.

Os corpos de prova para o ensaio de tração foram confeccionados com dimensões reduzidas, tipo subsize, seção retangular, retirados na direção de laminação da chapa e com comprimento da região útil (gage length) de 25mm. Uma representação esquemática do corpo de prova é feita na figura 1.

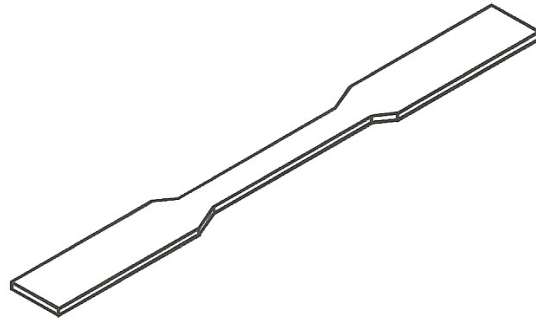
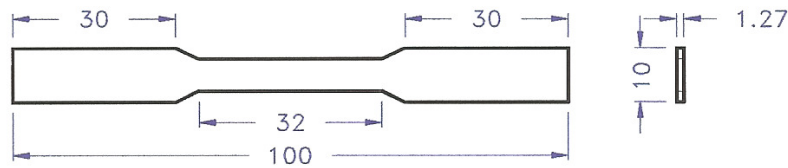


Figura 1. Representação dos corpos de prova utilizados em ensaios de tração e de determinação do coeficiente de anisotropia.

No ensaio de tração foram avaliados os seguintes parâmetros:

- limite de escoamento, determinado pelo método offset a 0,2%, em função das curvas tensão-deformação apresentarem escoamento contínuo;
- resistência à tração, calculada através do carregamento máximo aplicado durante o ensaio, dividido pela área inicial do corpo de prova; e
- alongamento, calculado através da variação percentual no comprimento da região útil do corpo de prova, após o rompimento.

O valor do alongamento do material, em função das características de anisotropia do aço, foi calculado através da seguinte equação:

$$Al (\%) = (Al_{0^\circ} + 2Al_{45^\circ} + Al_{90^\circ}) / 4 \dots\dots\dots(1)$$

onde  $Al_{0^\circ}$ ,  $Al_{45^\circ}$  e  $Al_{90^\circ}$  são, respectivamente, os valores do alongamento medidos em corpos de prova retirados a  $0^\circ$ , a  $45^\circ$  e a  $90^\circ$  em relação a direção de laminação.

Para determinação do coeficiente de anisotropia foi utilizado o procedimento manual. Como os aços laminados a frio e recozidos apresentam valores no coeficiente de anisotropia ( $r$ ) significativamente diferentes, em função do sentido de laminação, foi calculado o coeficiente de anisotropia médio ( $\bar{r}$ ), tornando-se necessária a retirada de corpos de prova nas direções paralelas ( $0^\circ$ ), diagonal ( $45^\circ$ ) e transversal ( $90^\circ$ ) com relação ao sentido da laminação.

## RESULTADOS

Como citado, os ensaios de tração foram realizados objetivando a determinação dos valores de alongamento, resistência à tração e limite de escoamento do material. Os resultados obtidos estão citados na tabela 4 e mostram algumas tendências bastante claras no comportamento mecânico do aço ultra-baixo carbono livre de intersticiais.

Tabela 4. Resultados obtidos nos ensaios de tração.

Condição	Limite de Escoamento (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)
1	135 ± 3	292 ± 3	53 ± 2
2	144 ± 3	298 ± 2	53 ± 2
3	151 ± 4	302 ± 3	51 ± 2

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de tração, pode-se afirmar que os valores do alongamento elevaram-se muito pouco em função de um aumento na temperatura de acabamento. Uma redução de 100°C na temperatura de acabamento, ou seja de 900°C (condição 1) para 800°C (condição 3), provocou uma redução no alongamento, em média, de 3%.

A elevação da temperaturas de acabamento ocasionou uma redução no limite de escoamento e na resistência à tração no aço ultra-baixo carbono livre de intersticiais. Com a redução da temperatura de acabamento de 900°C para 800°C, o limite de escoamento apresentou uma elevação média de 9,5%, aumentando de 135MPa para 151MPa, enquanto a resistência à tração elevou-se, em média, 3%, variando de 292MPa para 302MPa.

A tabela 5 mostra que o coeficiente de anisotropia médio é mais elevado quanto maiores forem a temperatura de acabamento e a temperatura de bobinamento, aplicadas na laminação a quente, durante o processamento termomecânico.

Tabela 5. Resultados obtidos no ensaio para determinação do coeficiente de anisotropia.

Condição	$\Gamma_{0^\circ}$	$\Gamma_{45^\circ}$	$\Gamma_{90^\circ}$	$\bar{\Gamma}$	$\Delta r$
1	2.19±0,04	2.03±0,03	2.37±0,03	2.16±0,02	0.25±0,02
2	2.15±0,03	1.96±0,02	2.38±0,02	2.11±0,04	0.31±0,04
3	2.13±0,03	1.91±0,03	2.34±0,05	2.07±0,02	0.33±0,02

Através da tabela 5 pode-se notar que na condição 1, onde a temperatura de acabamento aplicada foi de 900°C, foi atingido um coeficiente de anisotropia médio ou valor de Lankford de 2,16, bastante adequado quando se busca o desenvolvimento de um aço para aplicações em operações de estampagem. Este coeficiente, aliado a um valor no alongamento de 53%, caracteriza o aço como um material potencial para estampagem super-extra-profunda.

Se analisado em termos percentuais, o coeficiente de anisotropia médio apresenta uma redução média de 5%, ou seja de 2,16 para 2,07, quando a temperatura de acabamento diminui, de 900 para 800°C.

O coeficiente de anisotropia planar ( $\Delta r$ ) ou “earing tendency” apresentou uma elevação dos seus valores com a redução da temperatura de acabamento. A diminuição da temperatura de acabamento, de 900° para 800°, proporcionou um aumento nos valores do  $\Delta r$ , em média, de 27%.

Como pode ser visto na tabela 5 foi avaliado também a influência da temperatura de acabamento sobre os coeficientes de anisotropia ( $r$ ) conforme o sentido de laminação. Os resultados mostraram que os corpos de prova extraídos a 90°, em relação ao sentido de laminação, atingiram os mais altos níveis no coeficiente de anisotropia, sempre superiores a 2. Especificamente na condição 1, obteve-se um coeficiente bastante elevado de 2,37. Os valores de  $r$  dos corpos de prova retirados no sentido da laminação (0°) estiveram bastante próximos aos valores médios, em níveis levemente superiores. Por outro lado, os menores valores do coeficiente de anisotropia foram obtidos nos ensaios dos CDP's extraídos a 45°. Na situação 3, o valor de  $r$  chegou a atingir 1,91. Os resultados obtidos através deste ensaio evidenciam a anisotropia do material, que é uma característica fundamental presente nos aços ultra-baixo carbono livre de intersticiais.

## CONCLUSÕES

O trabalho investigou, em escala laboratorial, a influência do processamento termomecânico sobre as propriedades mecânicas de um aço ultra-baixo carbono livre de intersticiais. Em especial foram estudadas as variações na temperatura de acabamento já que, como demonstrado na revisão da literatura, existem fortes discordâncias e divergências quanto influência destes parâmetros sobre a estampabilidade do aço. Os resultados obtidos permitiram concluir que quanto ao efeito da temperatura de acabamento sobre as propriedades mecânicas dos aços UBC Ti-IF pode-se afirmar que as aplicações de uma temperatura de acabamento de 900°C ocasionou os mais altos valores no coeficiente de anisotropia médio ( $\bar{r}$ ) ou valor de Lankford e no alongamento, propriedades fundamentais para aplicações industriais onde se requer um material com características de estampagem extra-profunda. Conclui-se também que os níveis de resistência à tração e do limite de escoamento diminuíram, enquanto os valores do coeficiente de anisotropia médio e do alongamento aumentaram com a elevação da temperatura de acabamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GUPTA, I., PARAYIL, T., SHIANG, L-T. Effect of Processing Parameters on the Properties of Cold Rolled Interstitial Free Steels. In: HOT & COLD-ROLLED SHEET STEELS, Ed. by R. Pradhan and G. Ludkovsky, 1988, p.139-153.
2. KRAUSS, G., WILSHYNSKY, D.O., MATLOCK, D.K. Processing and Properties of Interstitial-Free Steels. In: INTERSTITIAL-FREE SHEET STEEL: PROCESSING, FABRICATION AND PROPERTIES, 1994, p.1-14.
3. TSUNOYAMA, K., SATOH, S., YAMAZAKI, Y., ABE, H. Recent Advance in Interstitial-Free Steels for formable Cold-Rolled Sheet Applications. In: METALLURGY OF VACUUM-DEGASSED STEEL PRODUCTS, Ed. by R. Pradhan, 1990, p.127-141.

4. TAKESHI, H., Recent Developments in the Metallurgical Technology of Continuous Annealing for Cold-Rolled and Surface-Coated Sheet Steels. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF RECENT DEVELOPMENTS IN THE ANNEALING OF SHEET STEELS, 1991, apud BORDIGNON, P.J.P., *Microliga em Chapas de Aço para Indústria Automobilística*, In: 1<sup>o</sup> SEMINÁRIO SOBRE CHAPAS METÁLICAS PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA, 1992, p.147-161.
5. TAKESHI, H., Metallurgical Aspects on Interstitial-Free Sheet Steels from Industrial Viewpoints. In: INTERNATIONAL FORUM FOR PHYSICAL METALLURGY OF IF STEELS, 1994, p.1-8.
6. TITHER, G., GARCIA, C.I., HUA, M., De ARDO, A.J., Precipitation Behavior and Solute Effects in Interstitial-Free Steels, In: INTERNATIONAL FORUM FOR PHYSICAL METALLURGY OF IF STEELS, 1994, p.293-322.
7. BLECK, W., Development of Cold-Rolled Extra-Low Carbon Sheet Steels at Thyssen Stahl AG, Thyssen Stahl Publication, 1991.
8. PRADO, M.C., Desenvolvimento de Aços - Interstitial Free (IF) - pela Usiminas, Seminário COLAM-ABM, 1991.
9. SATOH, S., OBARA, T., NISHIDA, M., IRIE, T., Effect of Alloying Elements and Hot Rolling Conditions on the Mechanical Properties of Continuously Annealed Extra-Low Carbon Steel Sheets, in : TECHNOLOGY OF CONTINUOUSLY ANNEALED COLD-ROLLED SHEET STEEL, ed. R. Pradham, 1985, p.151-166.
10. MATSUMOTO, T, TANAKA, Y., KAWASE, Y., Effect of a Hot-Rolling Condition on the Mechanical Properties of Cold-Rolled Extra Low Carbon Steel Sheet with Ti and Nb Addition, In: Tetsu-to-Hagané, 72 (5), 1987, p.S637.
11. TAKASAKI, J., SATOH, H., YASUDA, A., Method of Manufacturing Cold Rolled Steel Sheets for Extra Deep Drawing with an Excelent Press Formability, US Patent nº4,517,031, 1985.
12. FURONO, Y., KAWANO, A., SAYANAGI, S., MATSUDA, M., HAYAKAWA, H., SHIBATA, M., Effect of Hot-Rolling in Ferrite Phase on the Mechanical Properties of Very-Low Carbon Titanium Cold Rolled Sheet Steel, Tetsu-to-Hagané, 71 (13), 1985.
13. YODA, R., TSUKATANI, I., INOUE, T., SAITO, T., Effect of Chemical Composition on Recrystallization Behavior and  $\bar{r}$  - value in Ti-added Ultra Low Carbon Sheet Steel, ISIJ INTERNATIONAL, vol. 34, 1994, p.70-76.
14. SATOH, S., OBARA, T., NISHIDA, M., IRIE, T., Effect of Carbide Forming Elements on the Mechanical Properties of Continuously Annealed Extra-Low Carbon Steel Sheets, Trans. ISIJ, 24, 1984, p.836-846.
15. KWON, O., KIM, G., CHANG, R.W., In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON METALLURGY OF VACUUM-DEGASSED PRODUCTS, Ed. R. Pradham, TMS-AIME, Warrendale, (1990), p. 215-228.
16. HASHIMOTO, O., SATOH, S., IRIE, T., OHASHI, N., Ultra-Low C-Nb-P Steel with High Strength and Excellente Deep Drawability, in Proceedings of the International Conference on Advances in Physical Metallurgy and Applications of Steel, The Metals Society of Great Britain, 1982, p.21-24.
17. KASHIMA, K., HASHIMOTO, T. INOUE, H., INAGAKI, N., Tetsu-to-Hagané, 77 (1991), p.282-289.