

INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE RECOZIMENTO NAS CARACTERÍSTICAS DE AÇOS *DUAL PHASE*¹

João Francisco Batista Pereira²
Cláudio Franco Ribeiro³

Resumo

A transformação da austenita em martensita, durante o processamento no recozimento contínuo de aços *dual phase*, quase sempre demanda que esses aços sejam resfriados a baixas temperaturas, com altas taxas de resfriamento. Essa combinação impõe uma grande complexidade operacional, que, dependendo das características do equipamento, dentre elas o resfriamento acelerado, limita a velocidade do processo de recozimento, e, por extensão, a sua produtividade. Experiências em escala piloto foram então realizadas para avaliar a influência da taxa de resfriamento lento após encharque e das temperaturas inicial e final de resfriamento acelerado nas propriedades mecânicas de um aço *dual phase* da classe 600 MPa. Visou-se, sobretudo, estabelecer uma correlação entre super-resfriamento, propriedades mecânicas e velocidade da linha. Os resultados mostraram que as variáveis do processo de recozimento podem ser ajustadas de forma a permitir aumentos significativos na velocidade da linha, e conseqüentemente da produtividade, sem interferir de forma substancial nas propriedades mecânicas desse tipo de aço.

Palavras-chave: Aços de alta resistência; Recozimento contínuo; Aços *dual phase*.

THE INFLUENCE OF ANNEALING PARAMETERS ON THE DUAL PHASE STEELS CHARACTERISTICS

Abstract

The austenite-to-martensite transformation during continuous annealing process of dual phase steels frequently demands cooling to low temperatures at high cooling rates. This combination introduces an enormous operational complexity, which, depending on the annealing facilities, among them, the accelerated cooling system, limits the annealing process speed, and, for extension, its productivity. Experiments on laboratory scale were done to evaluate the influence of the slow cooling rate after soaking and the starting and final temperature in the accelerated cooling of a dual phase 600 MPa steel grade. It was aimed essentially: the establishment of correlation among accelerated cooling, mechanical properties and line speed. Results have shown that annealing process variables can be adjusted in order not to interfere substantially with mechanical properties and to permit expressive increases in the continuous line speed and productivity of such steels.

Key words: High strength steels; Continuous annealing; Dual phase steels.

¹ Contribuição técnica ao 45º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 21 a 24 de outubro de 2008, Ipojuca - Porto de Galinhas - PE

² Engenheiro Metalurgista, M.Sc.,MBA, Superintendência do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento de Processos da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Superintendência da Laminação a Frio da Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Os aços *dual phase*, DP, nome derivado da microestrutura típica que os caracteriza, são possuidores de uma excelente combinação de resistência mecânica e ductilidade, decorrente dessa característica microestrutural peculiar. São ainda característicos nesse tipo de aço, a ausência de patamar de escoamento definido, atribuída à grande quantidade de deslocações móveis na interface ferrita/martensita⁽¹⁾ e uma relação elástica em torno de 0,5.

A microestrutura típica dos aços *dual phase*, que tem na martensita seu constituinte mais característico, é obtida através do resfriamento da austenita a baixas temperaturas, com altas taxas de resfriamento, de forma a impedir a transformação difusional. Na prática operacional da laminação a frio, via recozimento contínuo, esses aços são resfriados a partir de temperaturas de 700°C até temperaturas da ordem de 250°C.

Dessa forma, quanto mais efetiva for a extração de calor no resfriamento acelerado mais facilmente é produzido esse tipo de aço e menores teores de liga, elementos estabilizadores da austenita, precisam ser adicionados.

Nesse trabalho foi avaliado em escala piloto, a influência do grau de super-resfriamento, ΔT , definido como a diferença entre a temperatura inicial e final de resfriamento acelerado, nas características de um aço *dual phase* da classe 600 MPa processado no recozimento contínuo. Os diferentes graus de super-resfriamento foram obtidos, tanto pela elevação da temperatura final, quanto pelo abaixamento da temperatura inicial de resfriamento acelerado. Avaliou-se também, a influência da velocidade de resfriamento lento após o encharque, usada para permitir a partição do carbono entre ferrita e austenita. Visou-se, essencialmente, estabelecer uma correlação entre super-resfriamento, propriedades mecânicas e velocidade da linha.

2 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE RESFRIAMENTO ACELERADO DO RECOZIMENTO CONTÍNUO DA USIMINAS

O recozimento contínuo da Usiminas conta com um sistema de resfriamento acelerado constituído de três sopradores de ar a alta pressão. Esses sopradores podem trabalhar isolados ou em conjunto, sendo ainda possível controlar a potência dos ventiladores .

A velocidade de resfriamento depende unicamente do meio de resfriamento e da espessura da chapa. No caso da Usiminas, o meio de resfriamento usa gás HN a alta pressão.

Conforme descrito anteriormente, além da taxa de resfriamento, a temperatura de transformação, ou seja, a temperatura máxima permissível após resfriamento acelerado, para garantir a completa transformação da austenita em martensita, é também decisiva. Nos aços *dual phase*, a adição de elementos de liga necessários para estabilizar a austenita abaixam a temperatura inicial de transformação martensítica, MS.⁽²⁾ Dessa forma, para que essas temperaturas sejam atingidas no processo industrial, é necessário que o tempo de residência da tira dentro do sistema de resfriamento seja aumentado, determinando assim baixas velocidades de processo.

A Figura 1 mostra que, havendo a necessidade de aumentar o super-resfriamento, a velocidade da linha deve ser reduzida para proporcionar o aumento do tempo de processo.

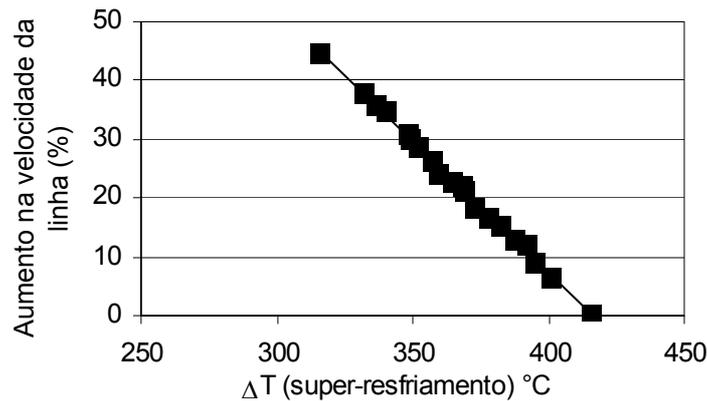


Figura 1. Influência do grau de super-resfriamento, ΔT , no aumento da velocidade da linha de recozimento contínuo. Aço com 1,2 mm de espessura. $\Delta T = 415^\circ\text{C}$ é o valor de referência.

3 MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL

Amostras *full hard* industriais de aço *dual phase* C-Mn de 1,2 mm de espessura, da classe 600 MPa, foram recozidas em escala piloto na máquina Gleeble com diferentes super-resfriamentos, conforme mostrado esquematicamente na Figura 2. A variação foi obtida, tanto pelo aumento da temperatura final (Figura 2(a)), como pelo abaixamento da temperatura inicial (Figura 2(b), no resfriamento acelerado. Super-resfriamento de 415°C é o valor adotado na prática operacional para esse aço, sendo considerado aqui como referência.

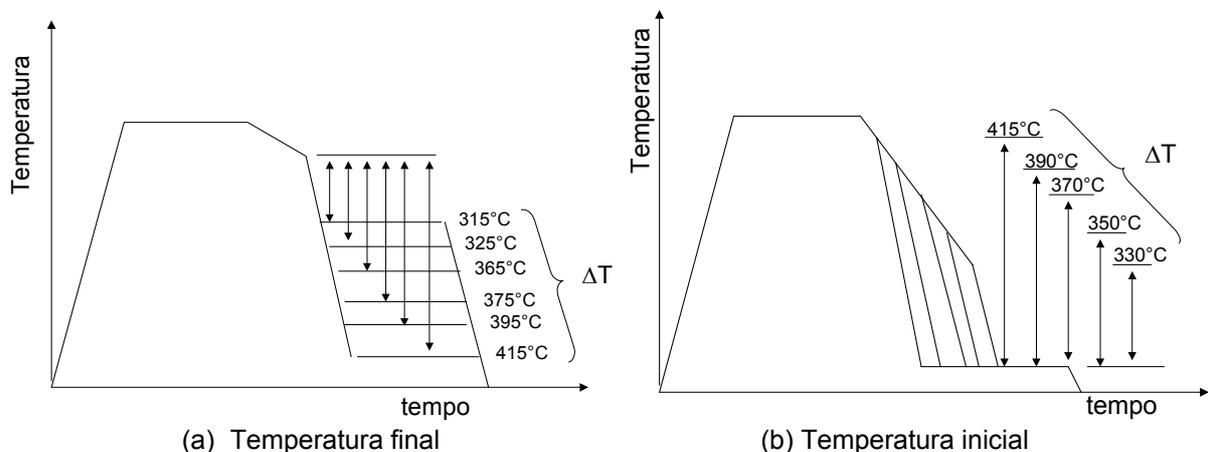


Figura 2. Ciclos de processamento experimental obtidos (a) aumentando-se a temperatura final e (b) diminuindo-se a temperatura inicial de super-resfriamento.

Outro parâmetro testado foi a influência da velocidade de resfriamento lento após o encharque, que é adotada para permitir a partição do carbono entre ferrita e austenita. O aumento nessa taxa poderia proporcionar uma diminuição da temperatura inicial de resfriamento acelerado, contribuindo para a redução do super-resfriamento (Figura 3).

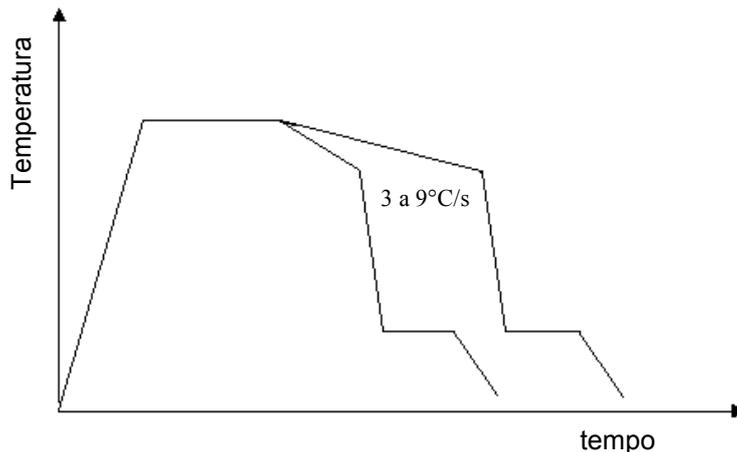


Figura 3. Ciclos esquemáticos de processamento experimental obtidos variando-se a velocidade de resfriamento lento de 3 a 9°C/s.

A caracterização mecânica do material foi feita através de ensaios de tração convencional segundo a direção longitudinal. A base de medida empregada foi de 25 mm.

A determinação metalográfica quantitativa dos constituintes presentes foi feita, primeiramente, atacando o material com nital 4% e medindo-se a porcentagem de ferrita. Após novo polimento, a amostra foi atacada com o reativo LePera para determinação da porcentagem de martensita. A porcentagem relativa aos constituintes como perlita, bainita, cementita, nesse trabalho denominada outros, foi obtida pela diferença em relação a 100%, dos constituintes ferrita e martensita.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme se verá nas figuras contendo a evolução das propriedades mecânicas, foram lançados, abaixo e acima da curva de limite de escoamento, LE, em linhas pontilhadas, os valores mínimo e máximo de norma⁽³⁾ previstos para aços da classe 600 MPa. Já em relação ao limite de resistência, LR, e ao alongamento total, AL, as linhas pontilhadas indicam os valores mínimos, respectivamente, 600 MPa e 20%. Para a relação elástica, RE, o valor máximo é 0,7.

4.1 Influência do Aumento da Temperatura Final de Resfriamento Acelerado

Os resultados da redução do super-resfriamento, obtida através do aumento da temperatura final de resfriamento acelerado nas propriedades mecânicas a tração, são mostrados na Figura 4.

Conforme pode ser observado, a redução no ΔT leva a uma queda no LR, enquanto o LE permanece aproximadamente constante. O alongamento total, assim como RE, não apresenta variação significativa até um ΔT da ordem de 365°C, abaixo do qual aumenta.

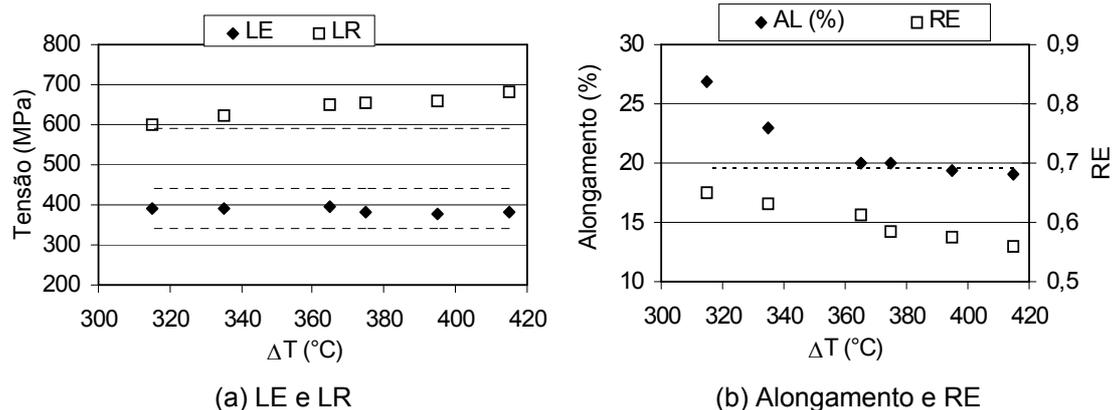


Figura 4. Propriedades mecânicas a tração de amostras processadas com diferentes super-resfriamentos obtidos pelo aumento da temperatura final de resfriamento acelerado.

Esses resultados podem ser explicados a partir da variação quantitativa dos constituintes presentes em função do super-resfriamento (Figura 5). Essa figura mostra que a quantidade de ferrita permanece relativamente constante enquanto que a martensita diminui lentamente até valores de ΔT da ordem de 365°C , a partir do qual experimenta uma queda mais sensível. A bainita aumenta quando o super-resfriamento é diminuído.

Esse comportamento explica razoavelmente os resultados encontrados. Em aços *dual phase*, a variação do LE tem sido comumente associada à proporção e as características da ferrita, enquanto a martensita é quem determina o comportamento do LR.⁽⁴⁾ Esse trabalho vem, portanto, ratificar esse comportamento.

O aumento no alongamento total quando se diminui o ΔT é atribuído ao revenimento da martensita e aumento na proporção de bainita. Estudos realizados⁽⁴⁾ mostraram, no entanto, que esse aumento do alongamento total não deve ser considerado como uma melhoria da ductilidade já que decorre do aumento do alongamento não uniforme, durante a estrição.

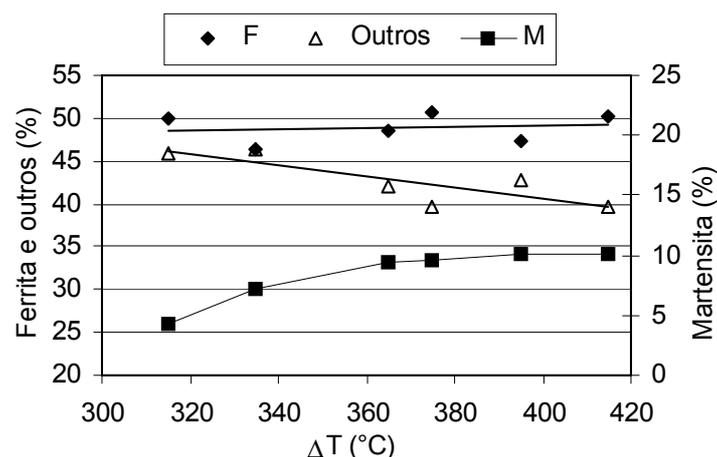


Figura 5. Variação quantitativa das fases presentes em função do super-resfriamento obtido a partir do aumento da temperatura final de resfriamento acelerado.

Uma característica importante dos aços *dual phase*, conforme já descrito, é não apresentarem patamar de escoamento definido. A elevação da temperatura final de resfriamento acelerado, ao contribuir para o aumento da proporção de constituintes

difusionais, cria condições para o aparecimento desse patamar, o que descaracterizaria esse tipo de aço.

A figura 6 mostra as curvas carga x deslocamento obtidas para os diferentes ΔT adotados nesse estudo. Conforme pode ser observado, mesmo para o menor super-resfriamento, a curva é contínua, sem presença de patamar, indicando que a quantidade de martensita remanescente, em torno de 4% (Figura 5), é suficiente para assegurar as características específicas desse tipo de aço. Mostra ainda que o ΔT não precisa ser tão rigoroso para que sejam atingidas as propriedades mecânicas requeridas em norma.

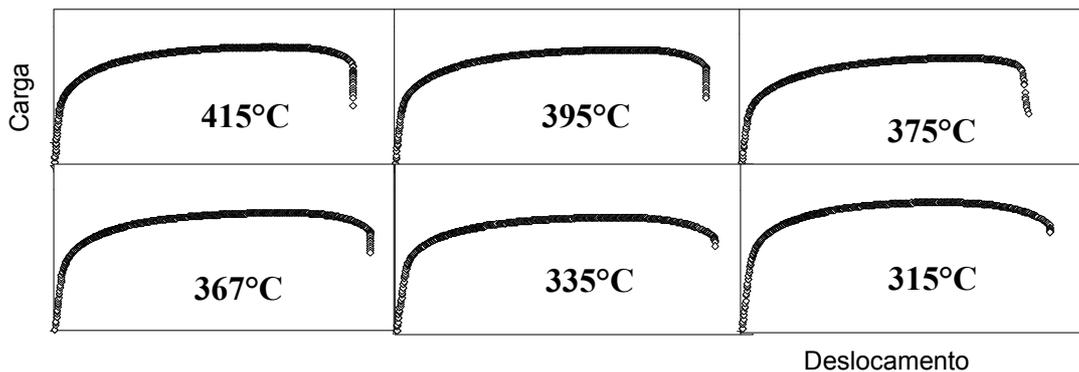


Figura 6. Curvas carga x deslocamento de amostras tratadas com vários super-resfriamentos obtidos pelo aumento da temperatura final de resfriamento acelerado.

Considerando a variação pouco significativa da quantidade de martensita e a relativa estabilidade das propriedades mecânicas dentro do intervalo de super-resfriamento de 415°C até 365°C, percebe-se que a velocidade da linha, de acordo com a figura 1, poderia ser elevada em até 23% em relação ao valor de referência, promovendo ganhos de produtividade no processamento desse aço.

4.2 Influência da Redução da Temperatura Inicial de Resfriamento Acelerado

Os resultados da variação do super-resfriamento, obtidos através do abaixamento da temperatura inicial de resfriamento acelerado, nas propriedades mecânicas a tração são mostrados na Figura 7.

Os resultados de propriedades mecânicas a tração mostram que a redução no ΔT não determina variações significativas em LE e LR, enquanto que o alongamento total aumenta para valores inferiores a 390°C. A RE permanece aproximadamente constante em todo intervalo avaliado.

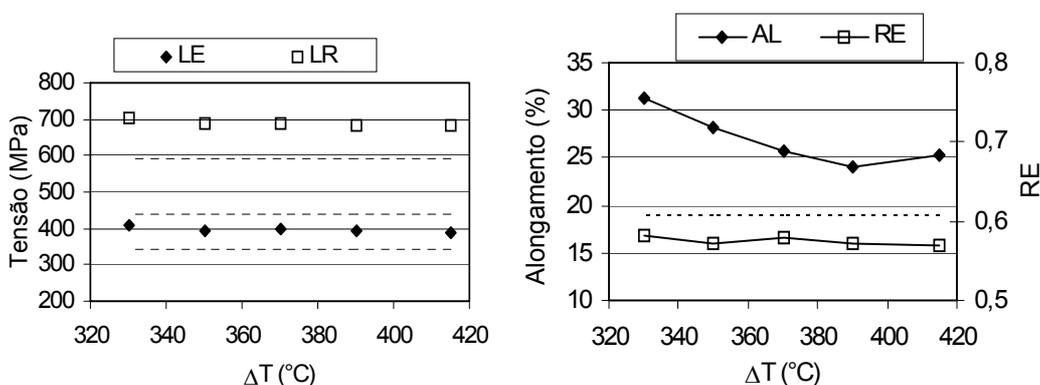


Figura 7. Propriedades mecânicas a tração de amostras processadas com diferentes super-resfriamentos obtidos pelo redução da temperatura inicial de resfriamento acelerado.

Também nesse caso, os resultados podem ser explicados a partir da variação quantitativa dos constituintes presentes em função do super-resfriamento (Figura 8).

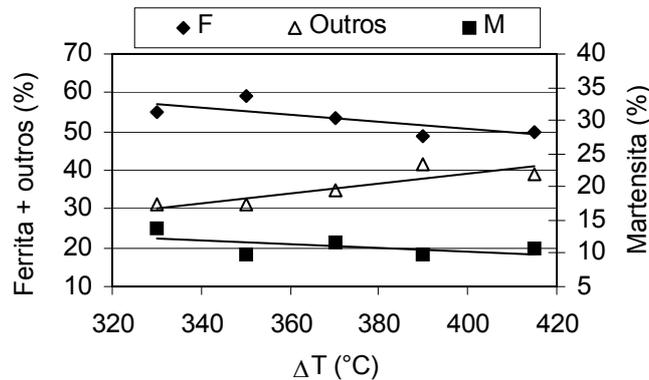


Figura 8. Variação quantitativa das fases presentes em função do super-resfriamento obtido a partir da redução da temperatura inicial de resfriamento acelerado.

Essa figura mostra que a quantidade de ferrita apresenta um ligeiro aumento quando a temperatura inicial de resfriamento acelerado é abaixada, diminuindo o super-resfriamento. Esse aumento na proporção de ferrita contribui para a redução da proporção de austenita em equilíbrio, anterior ao super-resfriamento. Embora em proporção menor, a martensita formada a partir de uma austenita mais rica em carbono, teria maior dureza. A conjugação desses fatores, além da elevação da quantidade de constituintes difusionais, poderia explicar também as variações pouco significativas de LE e LR e o aumento do alongamento total quando se diminui o super-resfriamento através da redução da temperatura inicial de resfriamento acelerado.

Da mesma forma que observado anteriormente, quando a temperatura inicial de resfriamento acelerado diminui, as curvas carga x deslocamento não apresentam patamar de escoamento definido (Figura 9), característica essa determinada pela presença de martensita.

Esse fato assegura que uma eventual diminuição do ΔT obtida pela redução da temperatura inicial de resfriamento acelerado pode ser realizada sem prejuízos para as propriedades mecânicas dessa classe de aço.

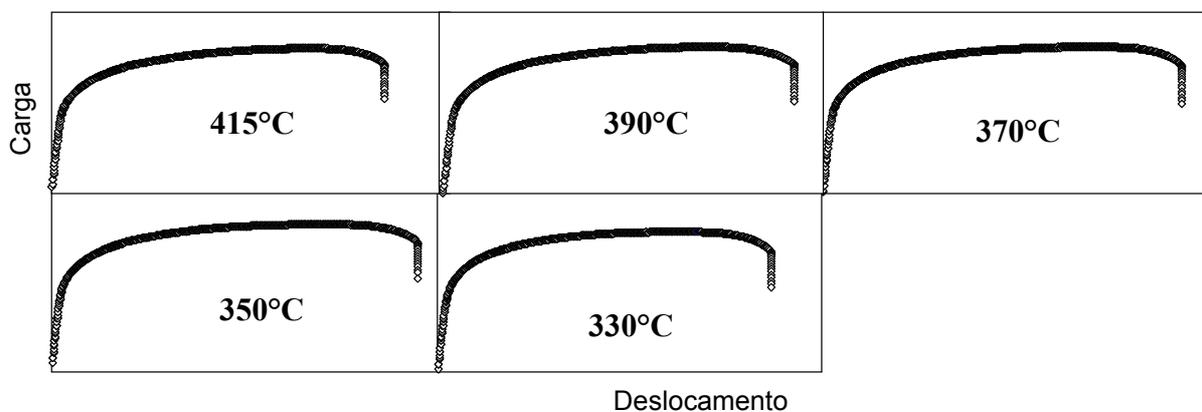


Figura 9. Curvas carga x deslocamento de amostras tratadas com vários super-resfriamentos obtidos pela redução da temperatura inicial de resfriamento acelerado.

Do mesmo modo que anteriormente mostrado, também no caso presente, teoricamente, aumentos de produtividade de até 38% poderiam ser obtidos quando a temperatura inicial de super-resfriamento é diminuída produzindo um ΔT de 330°C. Contudo, a incapacidade de se compatibilizar o aumento de velocidade da linha com a capacidade de resfriamento lento após encharque, limita esse número a valores mais modestos.

4.3 Influência da Velocidade de Resfriamento Lento após Encharque

Uma vez que a velocidade de resfriamento lento pode aumentar até valores da ordem de 10°C/s, essa variável se torna uma importante meio para reduzir o super-resfriamento através da redução da temperatura inicial de resfriamento acelerado.

A variação das propriedades mecânicas a tração em função da velocidade de resfriamento lento após encharque é mostrada na Figura 10.

Conforme se observa essa variável não introduz variações significativas nas propriedades e pode ser usada, caso necessário, para ajustes nos ciclos.

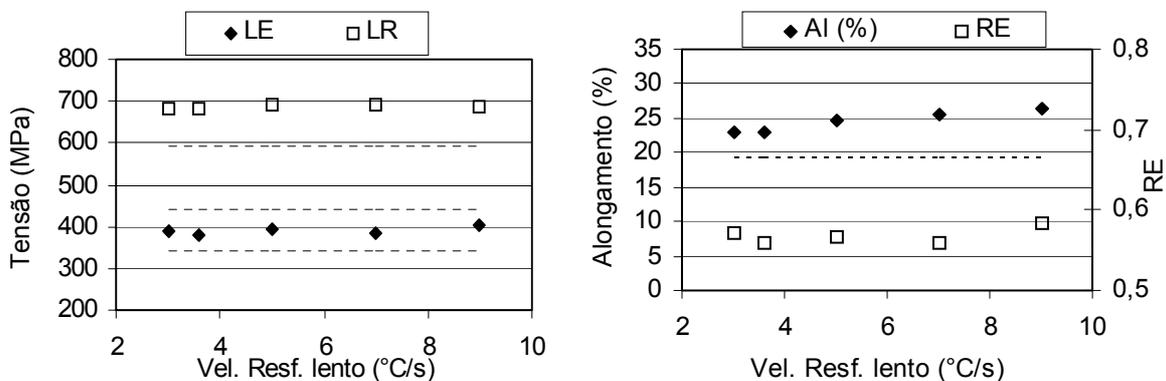


Figura 10. Propriedades mecânicas a tração de amostras processadas com diferentes velocidades de resfriamento lento.

5 Ciclos Combinados

Nas várias etapas do estudo, as variáveis foram testadas isoladamente, mantendo-se constante as demais. Contudo, em ciclos industriais de recozimento contínuo, a interdependência entre variáveis de processo às vezes impede que um parâmetro possa ser variado isoladamente sem interferir no processo como um todo. Considerando-se esse aspecto, foram propostos dois ciclos térmicos combinando-se as três variáveis estudadas, ou seja, aumentos da temperatura final de resfriamento acelerado e da velocidade de resfriamento lento após encharque, o que determinou também, a redução da temperatura inicial de resfriamento acelerado.

Os novos ciclos tomaram como base a temperatura final de resfriamento acelerado correspondente ao ΔT de 365°C, mínimo super-resfriamento onde a proporção de martensita se manteve estável (Figura 5), e a temperatura inicial de resfriamento acelerado correspondente à velocidade de resfriamento lento de 5,5°C/s. Esses novos ciclos são mostrados esquematicamente na [Figura 11](#).

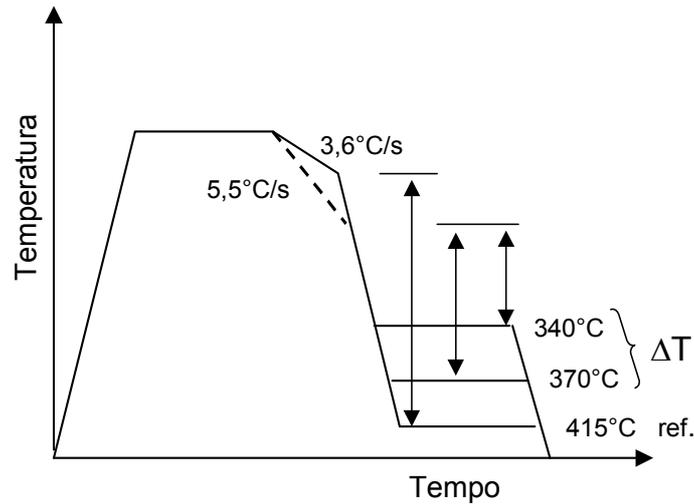


Figura 11. Ciclos de processamento combinados. 3,6°C/s é a taxa de referência.

Os resultados de propriedades mecânicas a tração e da proporção de constituintes das amostras processadas de acordo com esses dois ciclos são mostrados na Figura 12.

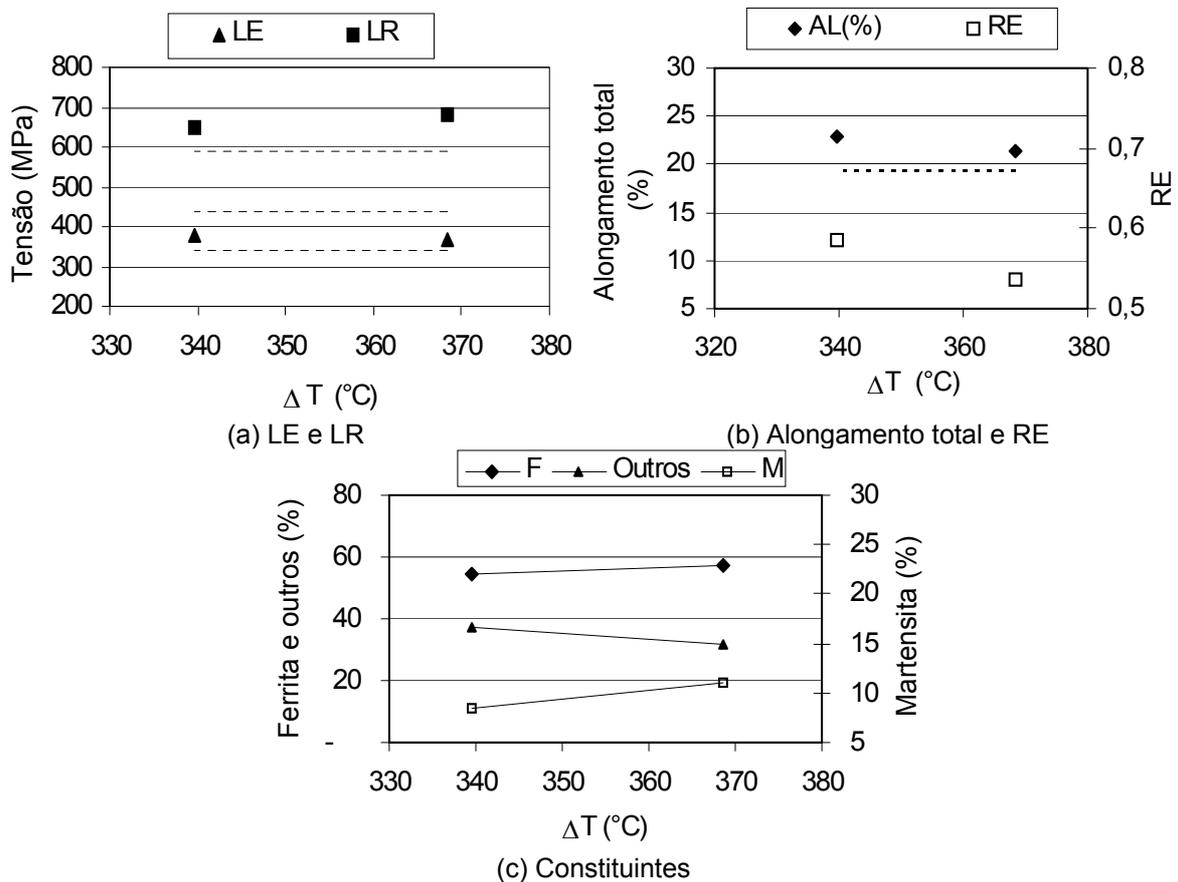


Figura 12. Propriedades mecânicas a tração e proporção de constituintes de amostras processadas nos ciclos combinados.

Os resultados aproximam-se daqueles já observados anteriormente quando o super-resfriamento foi diminuído como consequência da redução da temperatura inicial de resfriamento acelerado, ou seja, o LE não apresenta variação significativa, o LR diminui como resultado da redução da proporção de martensita e o alongamento total aumenta.

Essa conjugação de fatores permitiria que fosse alcançada no processo industrial uma melhoria de produtividade em torno de 35% para esse aço (Tabela 1). Experiências em escala industrial estão em andamento para comprovação dos resultados obtidos em escala piloto.

Tabela 1. Resultados dos ciclos combinados.

Aço	esp. (mm)	ΔT (°C)	Velocidade resf lento (°C/s)	Aumento na velocidade da linha (%)
DP600	1,22	415	3,6	0
		370	5,0	22
		340	5,5	35

6 CONCLUSÕES

A influência do super-resfriamento, obtido, seja através do abaixamento da temperatura inicial, seja pela elevação da temperatura final de resfriamento acelerado, ou ainda pelo aumento da velocidade de resfriamento lento, foi avaliada em laboratório para um aço *dual phase*, da classe 600 MPa de resistência mecânica e com 1,20 mm de espessura.

Os resultados mostraram que as propriedades mecânicas são mais significativamente afetadas quando o super-resfriamento é variado por alterações na temperatura final de resfriamento acelerado. Nesse caso o LR diminui com a redução do super-resfriamento, o alongamento total aumenta e o LE permanece aproximadamente constante. As variações, principalmente a do LR, foram explicadas em função da redução da proporção de martensita, decorrente do aumento da temperatura final de resfriamento acelerado.

Variações no super-resfriamento como função da diminuição da temperatura inicial de resfriamento acelerado não introduzem alterações significativas nas propriedades mecânicas assim como na microestrutura.

Aumentos de velocidade de até 35% e por extensão, da produtividade, na produção desse aço, foram conseguidos em escala piloto, ajustando-se o super-resfriamento através da combinação de todas as variáveis avaliadas. Essa conjugação de fatores permitiria que fossem alcançados resultados semelhantes no processo industrial ajustando-se os ciclos atuais.

REFERÊNCIAS

- 1 PICKERING, F. B. – Structure-Property Relationships in Steels. - Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment. Weinheim; New York; Basel; Cambridge: VCH, 1992, V7, p.43-90.
- 2 KRAUSS, G. – Microstructure and Transformations in Steel - Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment. Weinheim; New York; Basel; Cambridge: VCH, 1992, V7, p.2-37.
- 3 EN 10336 – Continuously hot-dip and electrolytically coated strip and sheet of multiphase steels for cold forming – Technical delivery conditions. August 2005, Draft.
- 4 BHATTACHARYA, D, et alli – A Family of 590 MPa, Advanced High Strength Steels with Various Microstructures, 45th MWSP Conference Proceedings, Vol. XLI, 2003.