

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO A FRIO E CICLO DE RECOZIMENTO CONTÍNUO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURA DE UM AÇO ARBL<sup>1</sup>

Rodrigo Luiz Dornelas de Andrade<sup>2</sup>  
Dagoberto Brandão Santos<sup>3</sup>

## Resumo

Os efeitos da redução a frio e da temperatura de encharque do ciclo de recozimento contínuo para um aço ARBL foram avaliados em três níveis diferentes. Amostras do material laminadas a frio industrialmente foram retiradas e submetidas à redução a frio em laminador piloto e posteriormente submetidas ao processo de recozimento na máquina Gleeble, simulando ciclos já padronizados para o processo industrial. Os resultados confirmaram que tanto a redução a frio quanto a temperatura de encharque no recozimento contínuo afetam significativamente as propriedades mecânicas deste aço. O tamanho de grão ferrítico foi mais afetado pela redução a frio que pelo recozimento, porém o ciclo de recozimento afetou de forma mais intensa as propriedades mecânicas do aço. Os resultados mostraram possibilidades de redução de custo através de modificações do processamento industrial até então praticado.

**Palavras-chave:** Aço alta resistência baixa liga; Redução a frio; Recozimento contínuo; Propriedades mecânicas.

## ANALYSIS OF INFLUENCE OF COLD REDUCTION AND CONTINUOUS ANNEALING CYCLE ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE OF AN HSLA STEEL

### Abstract

The effects of cold reduction and the soaking temperature of continuous annealing cycle for a HSLA steel were evaluated in three different levels. Samples of this steel, as industrially cold rolled, were submitted to additional cold reduction in pilot mill and subsequently subjected to annealing process in a GLEEBLE machine to simulating cycles already standardized for industrial process. The results confirmed that both cold reduction and soaking temperature in continuous annealing process caused significant effect on the mechanical properties of steel. The ferritic grain size was more affected by cold reduction than by annealing, but the cycle of annealing affected more intensively the mechanical properties of steel. The results showed possibilities for cost reduction through changes in the industrial processing currently practiced.

**Key words:** High strength low alloy steel; Cold reduction; Continuous annealing; Mechanical properties.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Membro da ABM; Engenheiro Metalúrgico; M.Sc.; Superintendência de Laminação a frio da Usiminas, Ipatinga, MG.

<sup>3</sup> Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, Dr.; Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG.



## 1 INTRODUÇÃO

Os aços planos produzidos para o atendimento aos vários setores da economia devem atender a uma série de exigências específicas para sua aplicação.

No caso da indústria automotiva, cada dia mais, é evidente a busca por aços de maior resistência mecânica e boa estampabilidade, tendo por objetivo a utilização de chapas de menor espessura, ou seja, de menor peso e que atendam à aplicação. O interesse da indústria automotiva em buscar materiais mais leves para a fabricação de veículos vai ao encontro dos interesses ambientais e econômicos. O veículo mais leve proporciona um menor consumo de combustível, com menor emissão de poluentes para a atmosfera terrestre.

É neste contexto que as empresas siderúrgicas trabalham, buscando o desenvolvimento de aços que atendam as mais diversas exigências de mercado com competitividade.

Entre o final do ano de 2008 e durante o ano de 2009, estivemos inseridos em um contexto mundial de crise que afetou diversos setores da economia global. No Brasil, devido à atual situação da economia e, dentre outros fatores, às medidas como redução de IPI, proporcionada pelo governo para incentivo ao consumo de veículos e eletrodomésticos, a crise pôde ser mais amena que em vários países pelo mundo. Com o advento da crise, a oferta de aço tornou-se muito superior que a demanda, o que ocasionou inicialmente no mercado externo a redução do preço por tonelada e gerou uma grande oportunidade de redução de custo de produção para as montadoras a importação de aço.

Não durou muito até que as siderúrgicas brasileiras se vissem na necessidade de redução de preço do seu aço, porém a redução de preço traz uma menor margem que, aliada ao menor volume de vendas durante a crise, obrigou as siderúrgicas a buscar fortemente a minimização dos custos de produção.

Para a redução dos custos de produção de aço, todas as possibilidades devem ser levadas em consideração, o investimento em modernização e automatização, reduzindo a mão de obra necessária para a produção, a otimização dos estoques e das sequências de produção, o consumo de matérias primas, a melhoria de rendimentos metálicos e o ganho de produtividade, dentre outras opções.

Para assegurar menores perdas na produção, seja por qualquer dos itens mencionados no parágrafo anterior, é extremamente importante o conhecimento das interferências dos processos operacionais nas propriedades desejadas do produto.

Dentre os vários tipos de aços de alta resistência utilizados pela indústria automotiva, estão os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL). A obtenção de elevados níveis de resistência mecânica para os aços ARBL laminados a frio se deve a obtenção de tamanho de grão ferrítico extremamente fino, a presença de precipitados finos coerentes e o endurecimento adicional por solução sólida.

Esse trabalho é focado justamente na avaliação de como cada parte do processo (redução a frio e ciclo de recozimento contínuo para um aço ARBL microligado com Nb) influencia as propriedades mecânicas e a microestrutura do produto final da classe de 410 MPa de limite de escoamento mínimo, laminado a frio e recozido continuamente.

O presente trabalho objetivou também a obtenção de um aço laminado a frio de mais elevada resistência (limite de escoamento mínimo de 550 MPa) ajustando as variáveis de redução a frio e ciclo de recozimento contínuo a partir de um aço com a composição química utilizada atualmente na Usiminas para a obtenção do limite de escoamento mínimo de 410 MPa.



## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material, utilizado para a execução do trabalho, foi escolhido a partir de um lote de aço de alta resistência e baixa liga em produção para atendimento ao limite de escoamento mínimo de 410 MPa. Este aço foi produzido em escala industrial até o processo de laminação a frio, onde sofreu redução a frio de aproximadamente 55%. Após a chegada do material na linha de recozimento contínuo, o mesmo foi amostrado antes deste processo para dar continuidade ao trabalho nos laboratórios do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas.

Concluída a seleção do material a ser utilizado no trabalho, foram retiradas duas amostras do aço sendo ambas nas dimensões de 800 x 1.200 mm para serem subdivididas em corpos de prova para os processos subseqüentes. Foi retirada também uma amostra de 500 x 1.200 mm na entrada do laminador a frio para análise da matéria prima anterior à laminação a frio.

Feito o recolhimento das amostras, estas foram subdivididas em corpos de prova, nas dimensões aproximadas de 150 x 200 mm, que foram submetidos a três reduções a frio diferentes (72%, 63% e 55%). Ao final desta etapa, os corpos de prova foram novamente divididos em amostras menores (50 x 150 mm), totalizando 27 corpos de prova para simulação de ciclo de recozimento contínuo na Gleeble com três temperaturas distintas de encharque (730°C, 760°C e 800°C) os ciclos de recozimento foram executados de acordo com ciclos já padronizados para produção em escala industrial. Cada grupo de amostras laminadas a frio foi dividido em três subgrupos para processo nos três diferentes ciclos de recozimento. Após o processo de recozimento contínuo, o encruamento foi fixado com deformação visada de 1,8% para todas as amostras, de forma a evitar sua interferência nas diferenças das propriedades mecânicas finais das amostras. A composição química também não trará efeitos nos resultados devido à amostragem ter sido realizada em uma mesma bobina (material de mesma corrida).

Finalizado o processamento dos corpos de prova, os mesmos foram encaminhados para ensaios de tração para determinação do limite de escoamento, limite de resistência e deformação. Foram realizadas também análises químicas e metalográficas das amostras.

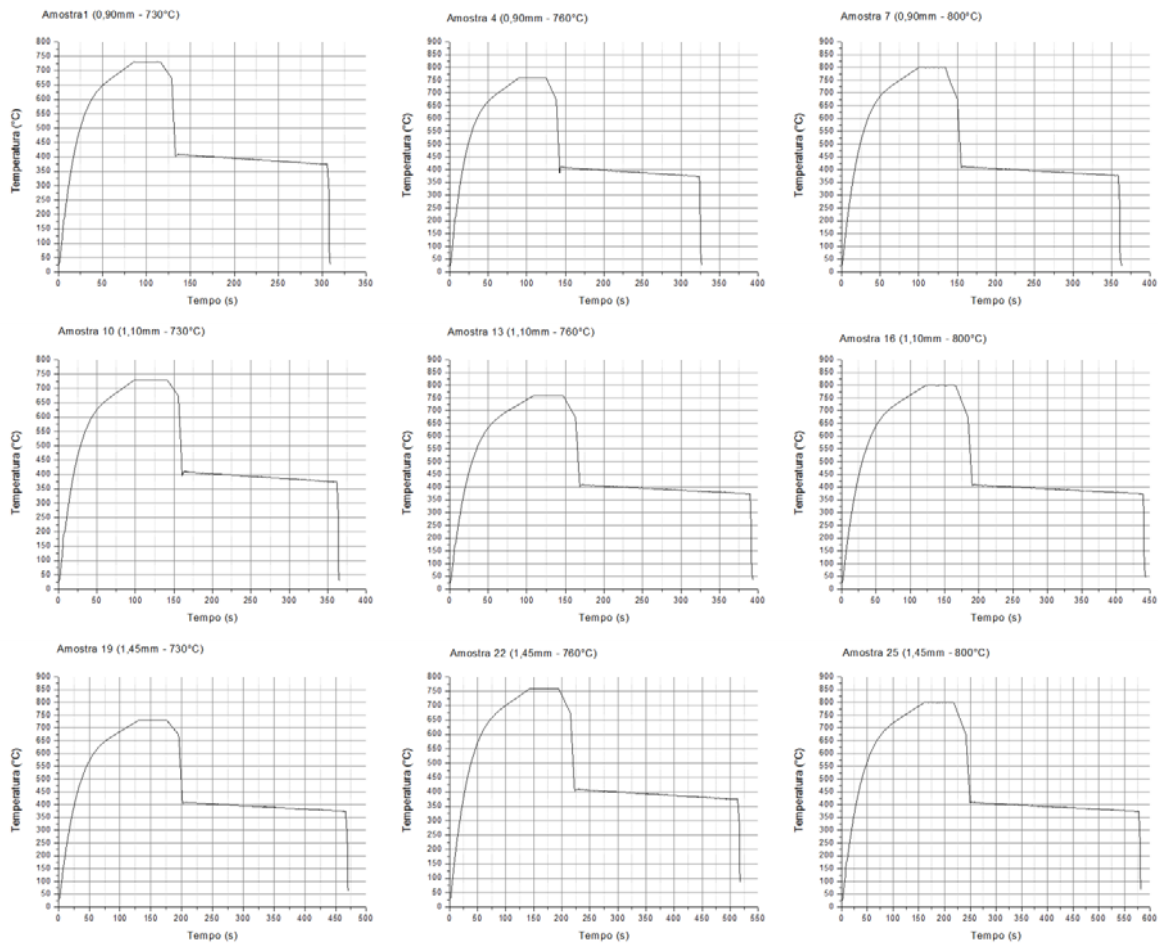
Na metalografia, a determinação do tamanho de grão ferrítico, anterior e posterior ao recozimento, foi feita utilizando método de interceptos baseado na norma ASTM-E-112,<sup>(1)</sup> com auxílio de um analisador de imagens. Para a revelação dos contornos de grãos foi utilizado ataque com nital 4% e a análise por microscopia óptica foi efetuada com aumento de 1.000 vezes. Já para a verificação da relação de fases, foi utilizado ataque com picral 4% e análise de imagem com aumento de 4.000 vezes.

Além dos testes acima descritos, foi realizada também a avaliação da temperatura de início de recristalização para a maior e menor redução a frio aplicada. A estimativa desta temperatura foi realizada aquecendo corpos de prova laminados a frio em temperaturas de 500°C até 720°C variando de 30°C em 30°C, resfriando bruscamente a amostra com água gelada e analisando a microestrutura com a finalidade de detectar o início da recristalização.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

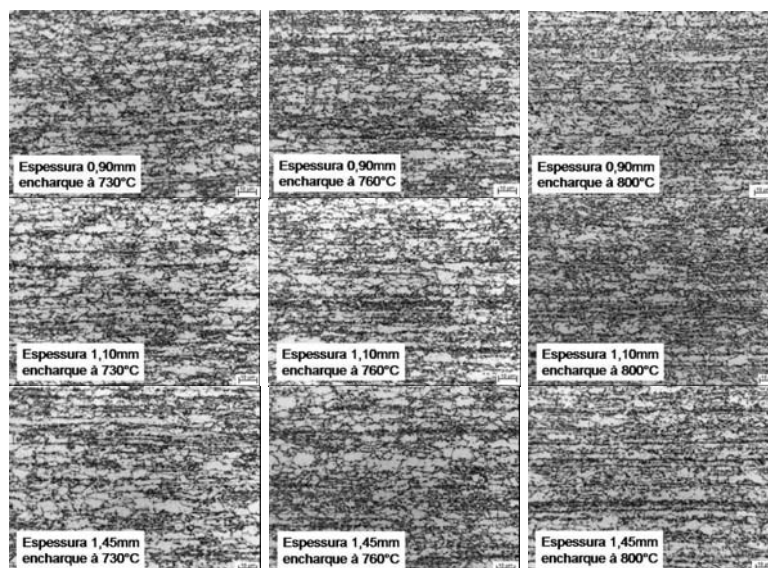
Para cada uma das reduções a frio obtidas (55%, 63% e 72%), foram simulados na máquina Gleeble, três ciclos de recozimento com cada temperatura de encharque

definida (730°C, 760°C e 800°C). A Figura 1 ilustra um dos ciclos aplicados para cada faixa de espessura e temperatura de encharque.



**Figura 1.** Ciclo térmico do aço ARBL aplicado na GLEEBLE.

As microestruturas obtidas após o processamento das amostras na Gleeble e encruamento com deformação fixada em 1,8% são exibidas na Figura 2.



**Figura 2.** Micrografias das amostras do aço ARBL após recozimento contínuo e encruamento.



Na medição da temperatura de início de recristalização, houve uma falha no procedimento aplicado e para as amostras com redução a frio de 72%, a recristalização somente foi observada para a temperatura de 720°C enquanto que para as amostras com redução de 55%, a recristalização já havia se iniciado com a temperatura de 680°C.

Com a maior redução a frio, é esperado que o material tenha maior força motriz para recristalização, sendo necessária menor temperatura para que se inicie o processo de recristalização. De acordo com a checagem efetuada neste estudo, foi observado o contrário, porém isto pode ser explicado pelo fato de que as taxas de aquecimento utilizadas no experimento não foram as mesmas, sendo que para o teste com temperatura de 680°C, a amostra com maior redução a frio foi aquecida com uma taxa de aquecimento superior à taxa utilizada para o aquecimento da amostra com menor redução. Desta forma, o material de menor redução a frio esteve por mais tempo em temperaturas elevadas. Como a recristalização é uma transformação que envolve nucleação e crescimento e tanto o tempo quanto a temperatura favorecem a recristalização, neste caso o maior tempo favoreceu a recristalização para a amostra de menor redução a frio, tornando o teste em questão para a temperatura de 680°C inconclusivo. Já para o aquecimento até a obtenção da temperatura de 720°C, a taxa de aquecimento aplicada foi a mesma para ambas as amostras e pode ser observado um pequeno acréscimo no percentual de fase recristalizada para o material de maior redução a frio.

A Tabela 1 mostra as taxas de aquecimento aplicadas para alcançar as temperaturas onde foram observadas a presença de grãos recristalizados e a fração recristalizada.

**Tabela 1.** Taxa de aquecimento e percentual de recristalização no aquecimento de um aço ARBL

| Temperatura alcançada | 55% de redução a frio |                 | 72% de redução a frio |                 |
|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
|                       | Aquecimento           | Recristalização | Aquecimento           | Recristalização |
| 680°C                 | 6,8°C/s               | 2,4%            | 10,4°C/s              | 0,0%            |
| 720°C                 | 8,5°C/s               | 2,9%            | 8,5°C/s               | 3,2%            |

Concluído o processamento do material na Gleeble e checagem de temperatura de início de recristalização, foram retirados corpos de prova das amostras recozidas para avaliação de limite de escoamento, limite de resistência, razão elástica, dureza, deformação total, tamanho de grão ferrítico e relação de constituintes (ferrita e perlita). Os resultados obtidos estão ilustrados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Resumo dos resultados dos ensaios de tração para o aço ARBL em estudo

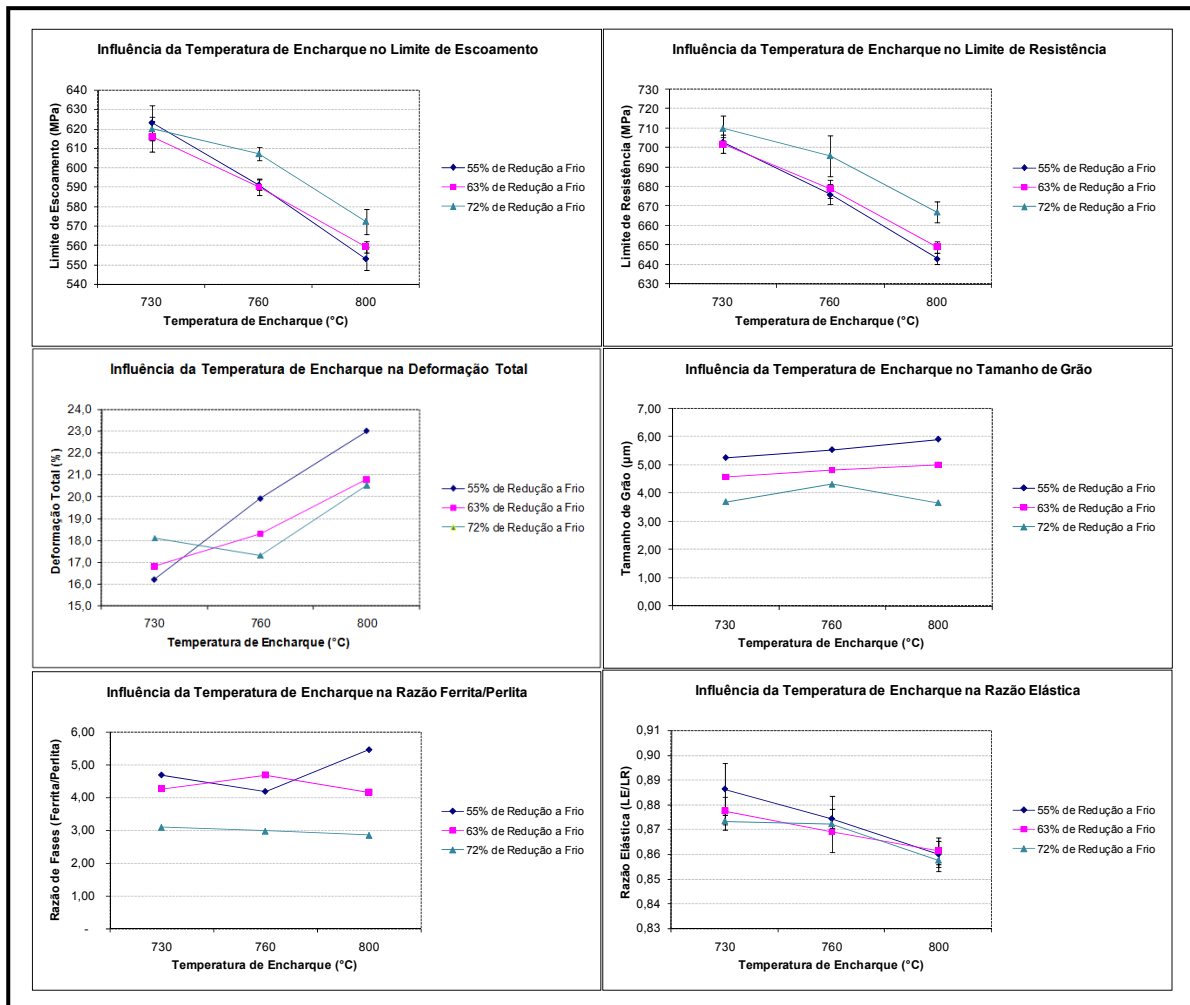
| Tipo de Aço                     | Ciclos Simulados | Redução (%) | Espes. (mm) | Temp. HF (°C) | Propriedades Mecânicas |          |      |                     |                     |       |
|---------------------------------|------------------|-------------|-------------|---------------|------------------------|----------|------|---------------------|---------------------|-------|
|                                 |                  |             |             |               | LE (MPa)               | LR (MPa) | RE   | Al <sub>u</sub> (%) | Al <sub>t</sub> (%) | n     |
| H<br>S<br>L<br>A<br>4<br>1<br>0 | C<br>A<br>P<br>L | 55          | 1,45        | 800           | 553                    | 643      | 0,86 | 11,0                | 23,0                | 0,099 |
|                                 |                  |             |             | 760           | 591                    | 676      | 0,87 | 9,5                 | 19,9                | 0,089 |
|                                 |                  |             |             | 730           | 623                    | 703      | 0,89 | 9,0                 | 16,2                | 0,087 |
|                                 |                  | 63          | 1,10        | 800           | 559                    | 649      | 0,86 | 11,1                | 20,8                | 0,102 |
|                                 |                  |             |             | 760           | 590                    | 679      | 0,87 | 10,0                | 18,3                | 0,097 |
|                                 |                  |             |             | 730           | 616                    | 702      | 0,88 | 9,2                 | 16,8                | 0,093 |
|                                 | 72               | 0,90        | 800         | 572           | 667                    | 0,86     | 12,0 | 20,5                | 0,116               |       |
|                                 |                  |             | 760         | 607           | 696                    | 0,87     | 9,8  | 17,3                | 0,097               |       |
|                                 |                  |             | 730         | 620           | 710                    | 0,87     | 10,6 | 18,1                | 0,102               |       |

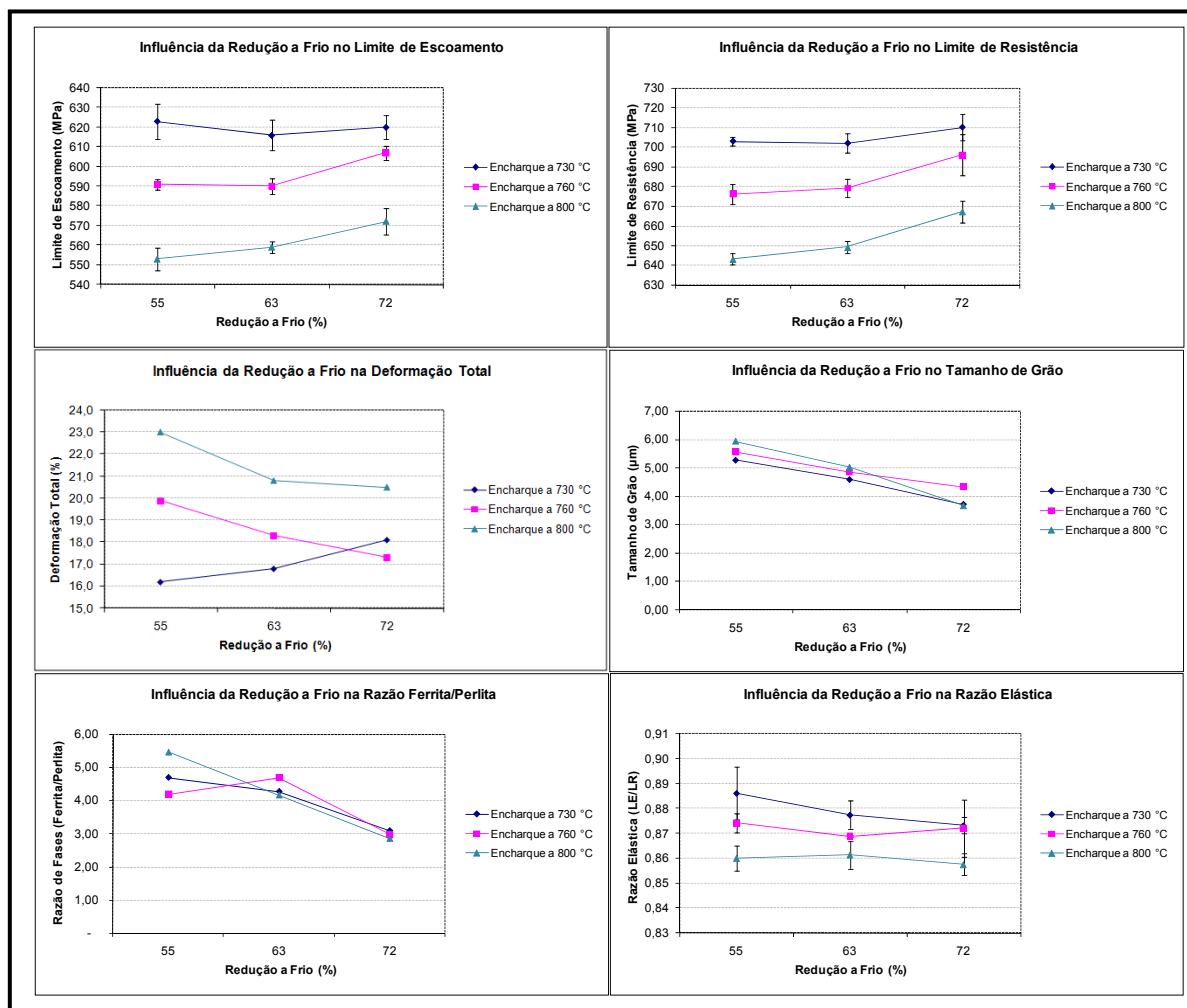
| Tipo de Aço                     | Ciclos Simulados | Redução (%) | Espes. (mm) | Temp. HF (°C) | Dureza Hv 2 kg | T Grão Ferrítico |           | (% de Fases) |         | Razão Ferrita/Perlita |  |
|---------------------------------|------------------|-------------|-------------|---------------|----------------|------------------|-----------|--------------|---------|-----------------------|--|
|                                 |                  |             |             |               |                | TG (µm)          | TG (ASTM) | Ferrita      | Perlita |                       |  |
| H<br>S<br>L<br>A<br>4<br>1<br>0 | C<br>A<br>P<br>L | 55          | 1,45        | 800           | 210            | 5,92             | 11,9      | 84,5         | 15,5    | 5,5                   |  |
|                                 |                  |             |             | 760           | 232            | 5,55             | 11,7      | 80,7         | 19,3    | 4,2                   |  |
|                                 |                  |             |             | 730           | 247            | 5,27             | 11,5      | 82,4         | 17,6    | 4,7                   |  |
|                                 |                  |             |             |               |                | 321 (*)          |           |              |         |                       |  |
|                                 |                  | 63          | 1,10        | 800           | 215            | 5,01             | 12,0      | 80,6         | 19,4    | 4,2                   |  |
|                                 |                  |             |             | 760           | 232            | 4,83             | 12,2      | 82,4         | 17,6    | 4,7                   |  |
|                                 | 730              |             |             | 242           | 4,58           | 12,2             | 81,0      | 19,0         | 4,3     |                       |  |
|                                 |                  |             |             |               | 322 (*)        |                  |           |              |         |                       |  |
|                                 | 72               | 0,90        | 800         | 224           | 3,66           | 12,7             | 74,0      | 26,0         | 2,8     |                       |  |
|                                 |                  |             | 760         | 244           | 4,32           | 12,0             | 74,8      | 25,2         | 3,0     |                       |  |
|                                 |                  |             | 730         | 252           | 3,70           | 12,7             | 75,5      | 24,5         | 3,1     |                       |  |
|                                 |                  |             |             |               | 328 (*)        |                  |           |              |         |                       |  |

\* Dureza do material full hard

As análises do limite de escoamento, limite de resistência, dureza, deformação total e deformação uniforme foram verificadas em três amostras na direção transversal à de laminação para cada condição de teste. A base de medida para a determinação da deformação total foi de 25 mm. Para facilitar a visualização da interferência da redução a frio e da temperatura de encharque do recozimento contínuo nas propriedades acima citadas, os valores obtidos estão representados graficamente nas Figuras 3 e 4.



**Figura 3.** Influência da temperatura de encharque nas propriedades mecânicas e microestrutura do aço ARBL.



**Figura 4.** Influência da redução a frio nas propriedades mecânicas e microestrutura do aço ARBL.

Com a análise dos resultados de ensaio de tração e metalografia, observa-se o efeito claro da temperatura de encharque no limite de escoamento, no limite de resistência, na deformação total e na razão elástica. Observa-se também um efeito, não muito relevante, no tamanho de grão, mas não foi possível observar influência na razão de fases ferrita / perlita. Para o caso da influência da redução a frio, observa-se claramente o efeito da mesma no tamanho de grão ferrítico e na relação de fases ferrita / perlita.

A redução significativa do limite de escoamento, do limite de resistência, da razão elástica, assim como a elevação da deformação total com o acréscimo da temperatura de encharque sugere-se ser devida principalmente ao coalescimento de precipitados de carbonitretos de nióbio, uma vez que o mecanismo de endurecimento por efeito de tamanho de grão não tem grande significado para as temperaturas de encharque aplicadas, visto que a variação do tamanho de grão foi pequena. Resultados similares foram encontrados na literatura por Fernandes<sup>(2)</sup> e Barbosa et al.<sup>(3)</sup> Turazi e Oliveira<sup>(4)</sup> mostraram também em seus experimentos que mesmo possuindo um tamanho de grão ferrítico maior, o aço ARBL laminado a frio e recozido possui dureza mais elevada que o aço C-Mn utilizado em seu estudo. Desta forma, sugeriu também que o mecanismo de endurecimento por precipitação nestes aços é de grande relevância.

Relacionando o que foi mencionado no parágrafo anterior com a equação proposta por Hall-Petch:  $\sigma_e = \sigma_1 + k_y \cdot d^{-1/2}$ , utilizando o valor de  $k_y$  conforme feito por





Goodman<sup>(5)</sup> para um aço microligado com Nb, onde  $k_y$  é  $16,5 \text{ MPa/mm}^{-1/2}$ , sendo  $d$  expresso em milímetros. A maior variação esperada do LE de acordo com as temperaturas de encharque aplicadas e tamanho de grão obtido ocorreu para o caso onde a redução a frio do material foi de 55%, porém mesmo assim, esta variação foi de apenas 13 MPa (contribuição do tamanho de grão no LE) e pode ser desprezada pelo fato desta representar apenas cerca de 2% do limite de escoamento final obtido para este material e estar dentro das variações de resultados (erros de medida) encontrados para os valores de LE deste aço.

Analisando a influência da redução a frio nas propriedades mecânicas e microestrutura do aço utilizado neste estudo, podemos verificar que ao contrário do resultado obtido por Bleck, Muschenborn e Meyer<sup>(6)</sup> e em concordância com os resultados obtidos por Pradhan<sup>(7)</sup> e Bae e Shin,<sup>(8)</sup> o acréscimo da redução a frio provocou também pequeno aumento do limite de resistência, do limite de escoamento e redução da deformação total. Este fato pode ser explicado devido à redução do tamanho de grão promovida nas amostras de maior redução a frio. Para isto, o estudo sugere que neste caso, o menor tamanho de grão final do material seja devido à ocorrência de total recristalização durante o ciclo de recozimento contínuo e que o material de maior redução a frio possuía maior força motriz para a recristalização, com mais sítios de nucleação, sendo assim, a taxa de nucleação para este material é maior que a das amostras com menor redução a frio, resultando em tamanho de grão menor.

Os resultados obtidos mostram ser possível a produção do aço ARBL com limite de escoamento mínimo de 550 MPa a partir da composição química e processos até a laminação a quente utilizados para a produção do aço ARBL com limite de escoamento mínimo de 410 MPa, bastando alterar o ciclo de recozimento e trazendo ainda maior produtividade, flexibilidade de produção, redução do consumo energético, atendendo às exigências (garantias) de propriedades mecânicas mencionadas anteriormente.

## 5 CONCLUSÃO

Para o efeito do recozimento contínuo, foi confirmado, conforme consenso na literatura pesquisada de que um acréscimo da temperatura de encharque iria reduzir a resistência do material supostamente através de coalescimento de precipitados e trazer pequeno aumento no tamanho de grão. Já para o caso da redução a frio, existem divergências na literatura quanto ao seu efeito. Este trabalho mostrou que o acréscimo da redução a frio de 55% para 72% para o material escolhido nas condições de processo aplicadas na Usiminas, resultou em acréscimo de resistência e redução do tamanho de grão ferrítico.

Para a prática industrial, foi verificada a possibilidade de redução de custos na Usiminas, pois mantendo a mesma composição química utilizada para a produção de um aço ARBL de menor resistência mecânica é possível a obtenção de um aço de resistência mecânica mais elevada, apenas alterando as condições de processo no CAPL.

## Agradecimentos

Agradecemos a todos que direta ou indiretamente nos ajudaram na execução do trabalho e, em especial:



À Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, destacando a pessoa do professor Dagoberto Brandão Santos, pelo apoio na realização deste trabalho e por todos os conhecimentos que pude obter nesta escola.

À Usiminas, pela oportunidade de realização deste trabalho, em especial à Luiz Cláudio de Oliveira Meyer, João Francisco Batista Pereira e Rogério Carlos de Oliveira Fernandes.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASTM Standard E112-96, "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size", Annual Book of ASTM Standards, 2007.
- 2 FERNANDES, R. C. O. Efeito da temperatura de encharque no recozimento contínuo e da deformação na laminação de encruamento sobre as propriedades mecânicas de um aço microligado laminado a frio. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2007 (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 3 BARBOSA, A. H. A., PEREIRA, J. F. B., ALVES, H. A., RIBEIRO, C. F. Influência dos Parâmetros de Recozimento Contínuo na Produção de Aços ARBL Laminados a Frio. In: Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos da ABM, Florianópolis, SC, 2001. p. 224-234.
- 4 TURAZI, A., OLIVEIRA, C. A. S. Estudo do Efeito do Processamento Termomecânico no Refino de Grão de Aços C-Mn e ARBL. In: Congresso Anual da ABM, Vitória, ES, 2007. p. 112-119.
- 5 GOODMAN, S. R. Metallurgy of High Strength Cold-Rolled Steel Sheets. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TECHNOLOGY AND APPLICATIONS OF HSLA STEELS, 1983, Philadelphia HSLA Steels Technology e Applications. Ohio: ASM, 1984. p.239-252.
- 6 Bleck, W.; Muschenborn, W.; Meyer, L.. Recrystallization and mechanical properties of microalloyed cold-rolled steel. Steel Res., vol.59, n.8, p. 344-351, 1988.
- 7 PRADHAN, R. Rapid Annealing of Cold-Rolled Rephosphorized Steels Containing Si, Cb and V, In: SYMPOSIUM ON METALLURGY OF CONTINUOUS ANNEALED SHEET STEEL, 1982, Dallas, Warrendale: AIME, 1982. p. 203-227..
- 8 BAE, D. C., SHIN, J. C. Development of High Strength Galvanized Steel Sheets. HSLA Steels: Processing Properties and Applications The Minerals, Metals & Materials Society, 1992. p. 329-333.