



AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE AÇOS BAIXO CARBONO CONTENDO Mn E Si MICROLIGADO COM Nb NA LAMINAÇÃO A QUENTE EM ESCALA PILOTO¹

Luiz Heleno Pereira Gaio²
Regis Antônio Albertassi Tavares²
Luiz Carlos de Andrade Vieira³
Geovani Rodrigues⁴
Andersan dos Santos Paula⁵
Léoosson Luiz de Souza⁶

Resumo

O aço é uma liga amplamente usada e objeto de estudo e desenvolvimento de intensas pesquisas, visto que não foi obtida uma compreensão completa da física que controla seus processos e propriedades. A finalidade desse trabalho é estudar como se comportam mecanicamente aços baixo carbono de composições químicas distintas, em termos de Mn e Si, durante o processo de laminação a quente em escala piloto e correlacionar com sua evolução microestrutural. O estudo comparativo do comportamento mecânico de três aços baixo-carbono contendo Mn e Si microligados com Nb foi observado pelo processo de laminação a quente em escala piloto, o qual foi monitorado por um programa capaz de adquirir dados referentes a temperatura dos corpos de prova, abertura dos cilindros, esforços a que são submetidos e o tempo de duração de cada passe. A caracterização dos aços em estudo tem como objetivo a identificação das temperaturas de transformação de fase (dilatometria de têmpera) e avaliação microestrutural antes e após o processamento.

Palavras-chave: Comportamento a mecânico a quente; Aços baixo-carbono; Evolução microestrutural.

Nb MICROALLOYED LOW-CARBON STEELS CONTAINING Mn AND Si MECHANICAL BEHAVIOR EVALUATION ON HOT ROLLING IN PILOT SCALE

Abstract

Steel is a widely used alloy and a goal for study and development of intense research since was not gotten a complete understanding of the physics that controls theirs processes and properties. The goal of the present work is study how Nb microalloyed low carbon steels containing Mn and Si at different proportions mechanically behavior on hot rolling in pilot scale process and to correlate with microstructural evolution of those steels during the processing. The mechanic behavior comparative study of three Nb microalloyed low carbon steel containing Mn and Si was observed by hot rolling process in pilot scale, which was monitored by a program able to collect data concerning with sample temperature, cylinder gap, load and time for each thickness reduction. The characterization of the steel in study has the proposal the identification of the phase transformation temperatures (dilatometry) and microstructural (optical microscopy) evaluation before and after the processing.

Key words: Hot mechanical behavior; Low-carbon steels; Microstructural evolution.

¹ Contribuição técnica ao 65^o Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Graduandos, UniFOA, Graduação em Engenharia de Produção – Volta Redonda/RJ – Brasil.

³ Técnico de Laboratório, UniFOA, Núcleo de Pesquisa e Graduação – Volta Redonda/RJ – Brasil e Técnico de Laboratório, UFF/EEIMVR – Volta Redonda/RJ – Brasil.

⁴ Professor, D.Sc., UNIFEI – Itajubá/MG – Brasil.

⁵ Professora, D.Sc., UFF/EEIMVR – Volta Redonda/RJ – Brasil.

⁶ Engenheiro, CSN, GPD – Gerência de Pesquisa e Desenvolvimento – Volta Redonda/RJ – Brasil e Aluno do Mestrado em Eng. Metalúrgica - Mestrado, UFF/EEIMVR – Volta Redonda/RJ – Brasil.



1 INTRODUÇÃO

A metalurgia física de materiais ferrosos é um campo extenso, no qual o aço é uma liga amplamente usada e objeto de estudo e desenvolvimento de intensas pesquisas, uma vez que uma compreensão completa da física que controla processos e propriedades desse material ainda não foi obtida.⁽¹⁾ As diferentes formas alotrópicas e os mecanismos de transformação de fase conferem ao aço uma versatilidade tanto nos microconstituintes quanto nas propriedades a serem exploradas industrialmente.⁽²⁾

Os desafios impostos pela indústria levaram a busca de alternativas que aumentassem a resistência e ductilidade do aço.⁽³⁻⁸⁾ Em contrapartida, é importante a utilização das melhores práticas de processamento com base no conhecimento do comportamento mecânico a quente destes materiais ao longo do processo de laminação a quente. A laminação controlada em aços tendo seus parâmetros associados a sua composição química tem por objetivo produzir essas propriedades mecânicas singulares, devido a uma microestrutura diferenciada obtida por diversos fatores, tais como: (i) elementos/precipitados que controlaram o crescimento de grão austenítico; (ii) atuação nos processos de recristalização da austenita durante a deformação a quente (recristalização dinâmica, meta-dinâmica e estática) que influenciará no número de novos núcleos de austenita recristalizada produzindo assim uma microestrutura ferrítica mais refinada após a transformação de fase na etapa de resfriamento; (iii) elementos/precipitados que aumentaram a temperatura de não recristalização da austenita, fazendo assim que haja o encruamento da ferrita durante o processo de laminação sem posterior recristalização e alterando natureza da ferrita transformada (tamanho de grão e textura cristalográfica); (iv) laminação no campo intercrítico, onde em simultâneo são deformados grãos austeníticos e ferríticos; (v) o controle da taxa de resfriamento também permite modificar a propriedades do material, pois irá afetar diretamente na natureza e morfologia dos microconstituintes formados durante o resfriamento; e (vi) finalmente para chapa laminadas a quente e fornecidas na forma de bobinas, a temperatura de bobinamento e taxa de resfriamento aplicada nesta etapa poderá afetar as propriedades, por meio da precipitação na ferrita já transformada, ou na natureza/morfologia de outros constituintes (baínita ou martensita e/ou austenita retida).

No presente trabalho, foi feito um estudo comparativo entre a correlação da composição química e o comportamento mecânico de três aços baixo-carbono contendo Mn e Si microligados com Nb, por meio do monitoramento do processo de laminação a quente em escala piloto. O levantamento das temperaturas de transformação (A_1 , A_3 , Ar_3 e Ar_1) foi feita por dilatometria de têmpera. A avaliação da evolução microestrutural e mecânica destes aços após processamento, com base na morfologia antes e após a laminação a quente, foram observadas por meio de microscopia óptica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e medidas de dureza.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

As amostras de esboço de aços baixo-carbono contendo Mn e Si microligados ao Nb que foram utilizadas para o presente estudo foram fornecidas pelo Centro de

Pesquisas da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN). Estas amostras serão denominadas neste trabalho como recebida, todas elas foram fundidas e laminadas em escala piloto. A Tabela 1 mostra as composições químicas dos aços laminados.

Tabela 1 – Composições químicas dos aços laminados a quente pelo laminador piloto da CSN

Ligas	C	Mn	Si	Nb	S	P	Al	Ni	Cr	N
Liga 1	0,154	1,386	1,405	0,034	0,011	0,022	0,022	0,008	0,018	0,0132
Liga 2	0,136	1,489	0,948	0,047	0,008	0,019	0,051	0,010	0,020	0,0156
Liga 3	0,111	1,381	0,985	0,013	0,012	0,022	0,032	0,007	0,013	0,0119

2.2 Laminação a Quente em Escala Piloto

Os corpos de prova, com dimensões de 32 x 50 x 60 (mm), foram processados por laminação a quente em escala piloto através de vários passes de laminação. Por meio de um orifício de aproximadamente 3,5 mm de diâmetro em uma das faces laterais do corpo de prova, aberto com furadeira, foi introduzido por encaixe um termopar (tipo K) com o intuito de monitorar a temperatura durante o processo de laminação a quente em escala piloto.

Os corpos de prova foram pré-aquecidos em um forno com temperatura de aproximadamente 750°C, permanecendo nessa temperatura por uma hora e meia para encharque. Em seguida, foram transferidos para um segundo forno, com a temperatura de 1.230°C (Liga 1, Liga 2, Liga 3), onde permaneceram por uma hora no máximo para encharque. Em seguida, os corpos de prova foram laminados a quente em escala piloto utilizando os parâmetros de processamento conforme descrito na Tabela 2, no que diz respeito a faixa de temperatura e reduções a serem praticadas em cada passe. De forma a poder-se verificar as evidências microestruturais provenientes do processo de deformação a quente na austenita, logo após o passe redução F3 os materiais foram resfriados em salmoura até atingir a temperatura do banho.

Tabela 2 – Parâmetros usados para o processo de laminação piloto

Passes	Temperaturas em °C (Encharque a 1230°C) Máximo - Mínimo	Reduções (mm)	Reduções (%)
R1	1230	35 – 28	20,0
R2	1200	28 – 23	17,9
R3	1150	23 – 18	21,7
F1	1060 – 1050	18 – 13	27,8
F2	1010 – 1000	13 – 9,4	27,7
F3	970 – 950	9,4 – 7	25,5

A partir das temperaturas de transformação de fase, no aquecimento e no resfriamento (A_1 , A_3 , Ar_3 e Ar_1 – como mostra a Tabela 3), obtidas por meio de ensaios experimentais num dilatômetro (DT1000 da Adhamel), com taxas de aquecimento/resfriamento de 1°C/s, foram definidas as temperaturas para o processamento termomecânico, de forma que todos os passes de redução fossem executados dentro do campo austenítico (Tabela 2).



Tabela 3 – Temperaturas de Transformação de Fase

Ligas	Temperaturas de Transformação de Fase (°C)			
	Aquecimento		Resfriamento	
	A ₁	A ₃	Ar ₃	Ar ₁
Liga 1	744	912	807	622
Liga 2	731	879	787	611
Liga 3	720	896	745	617

2.3 CARACTERIZAÇÃO

A caracterização microestrutural dos corpos de prova dos aços baixo-carbono contendo Mn e Si microligados ao Nb laminados a quente em escala piloto foi realizada através do microscópio óptico – MO e microscópio eletrônico de varredura – MEV (Zeiss – DSM 962).

3 RESULTADOS

A Figura 1 apresenta os valores de tensão imposta nas ligas em estudos para obter a redução proposta para cada passe, com base nos parâmetros de processamento indicada na Tabela 2.

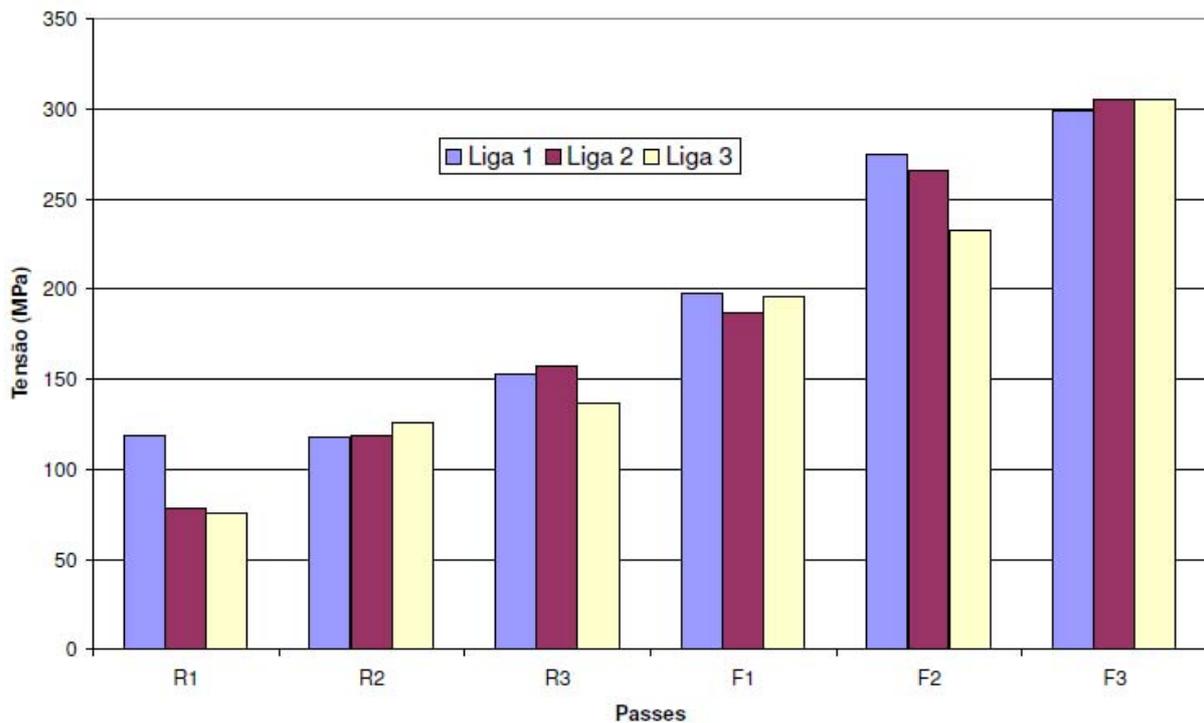


Figura 1 – Gráfico da evolução da tensão necessária para impor a redução a cada passe aplicada no processamento termomecânico das Ligas 1, 2 e 3.

A avaliação microestrutural das amostras das ligas em estudo na condição como recebida, anterior o processo de laminação a quente em escala piloto, foi realizada via microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), como mostram as Figuras 2 e 3.

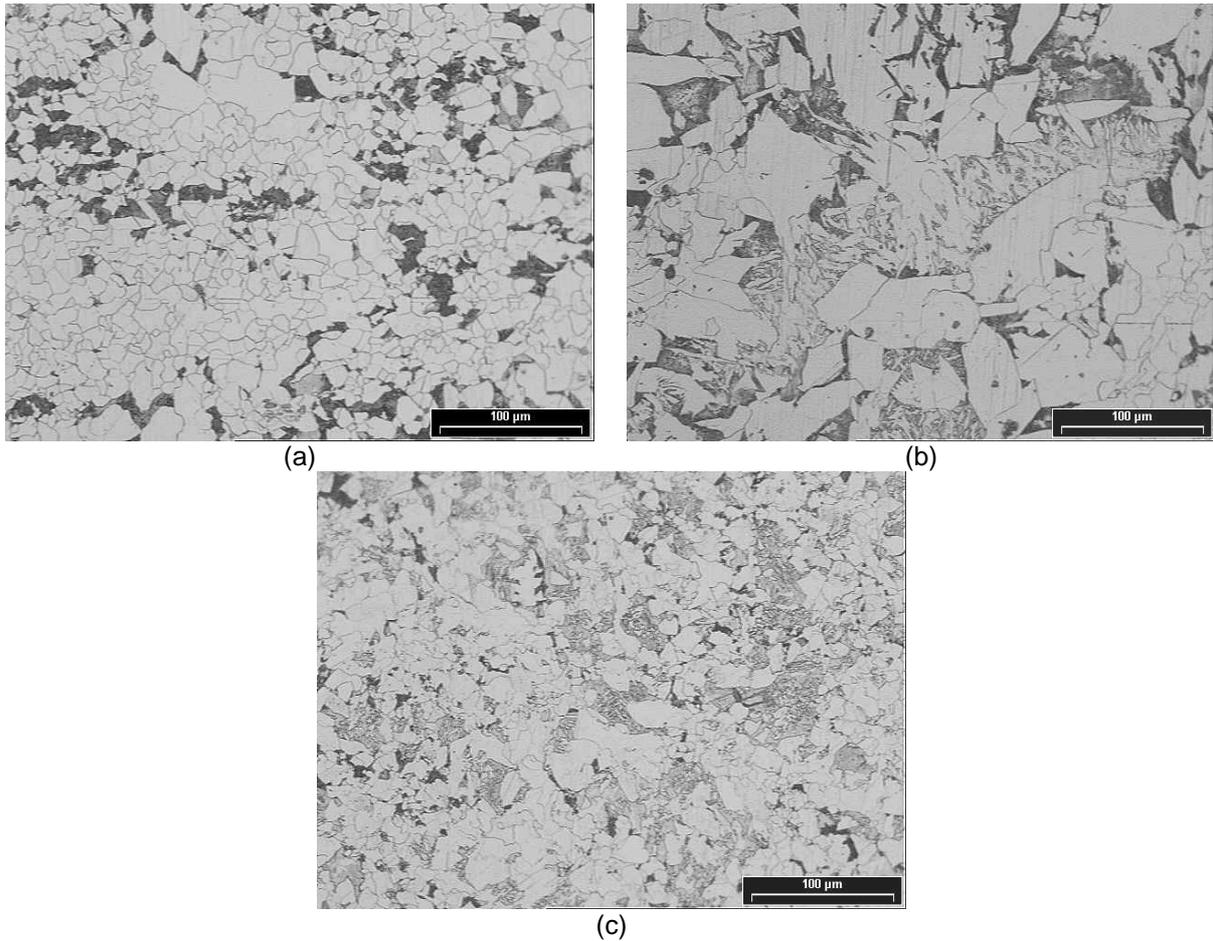


Figura 2 - Microestruturas das amostras das ligas em estudo na condição como recebida, obtidas por Microscopia Ótica: (a) LIGA 1. (b) LIGA 2. (c) LIGA 3. Aumento 200x. Nital 3%.

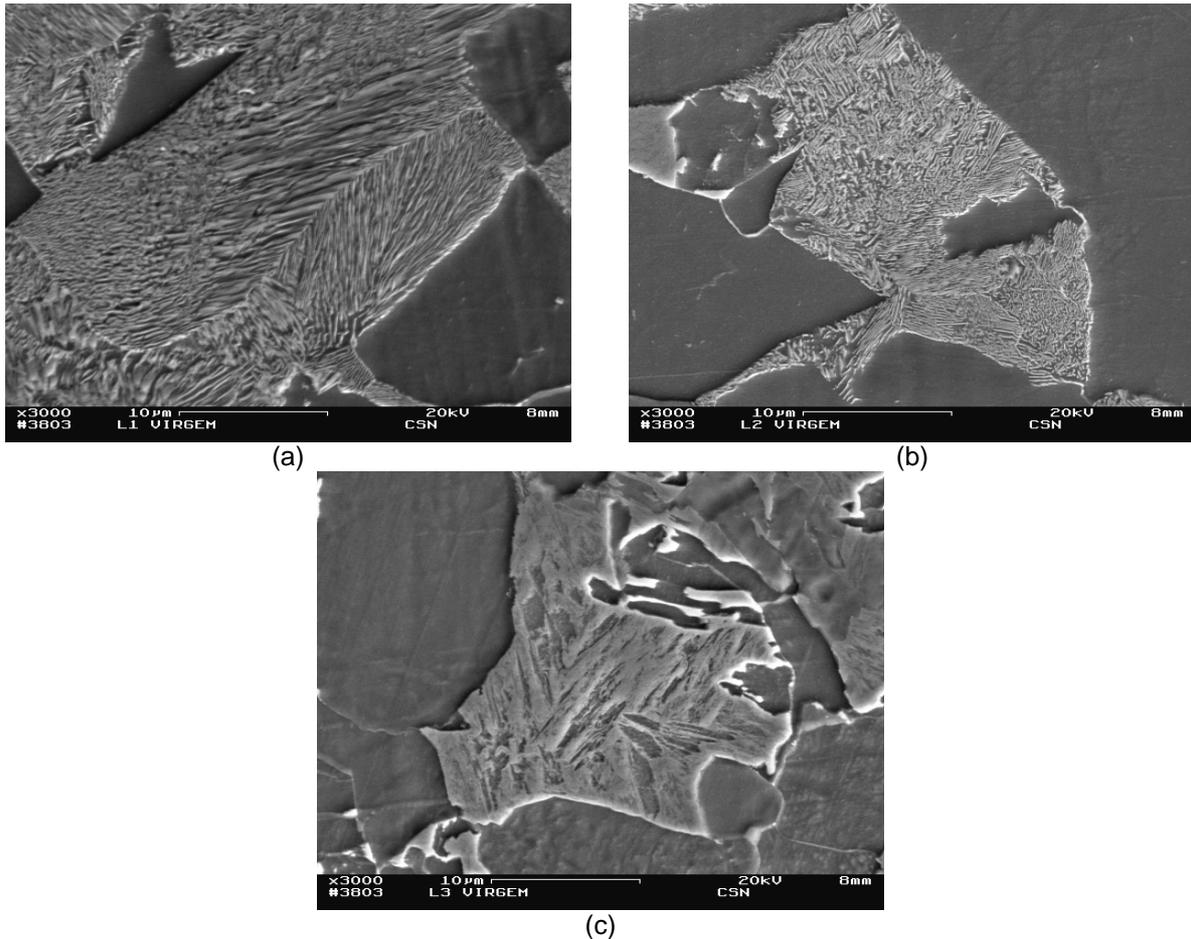


Figura 3 – Detalhamento das microestruturas das amostras das ligas em estudo na condição como recebida, obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura: (a) LIGA 1. (b) LIGA 2. (c) LIGA 3. Aumento 3000x. Nital 3%.

A avaliação microestrutural das amostras das ligas em estudo após o processo de laminação a quente em escala piloto e resfriamento brusco em salmoura (definido na Tabela 2), foi realizada via microscopia ótica (MO), como mostra a Figura 4.

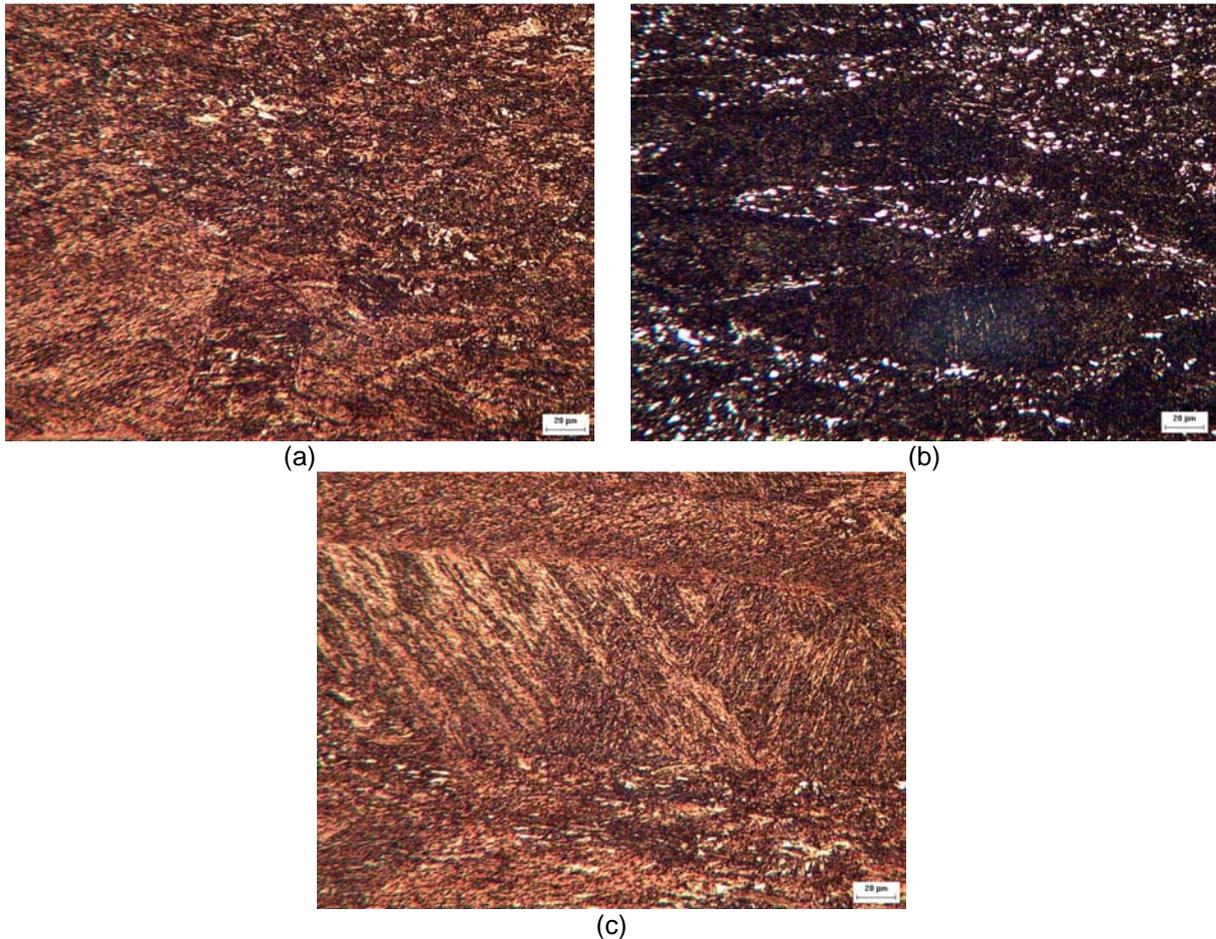


Figura 4 - Microestruturas das amostras das ligas em estudo após o processo de laminação a quente em escala piloto (definido na Tabela 2), obtidas por Microscopia Ótica: (a) LIGA 1. (b) LIGA 2. (c) LIGA 3. Aumento 100x. Nital 3%.

4 DISCUSSÃO

Com base nos resultados de dilatometria (Tabela 3) associados às temperaturas de transformação A_1 , A_3 , Ar_3 e Ar_1 , em comparação com as evidências relativas às respostas mecânicas referentes às cargas impostas aos aços em estudo (Figura 1) e suas respectivas temperaturas e reduções em cada passe (Tabela 2), podemos afirmar que todo o processo de laminação ocorreu no campo austenítico e que o aumento da resistência a deformação entre os aços é gradativo a cada passe, como mostra a Figura 1, pelo aumento da tensão necessária para uma mesma redução e faixa de temperatura (Tabela 2). Com base nos resultados de Ferreira,⁽⁹⁾ o aumento na resistência a deformação a quente nos aços microligados está associado a: (i) a laminação da austenita não recristalizada entre passes, isto é, abaixo da temperatura de não recristalização (T_{NR}); e (ii) a precipitação, induzida por deformação, como carbonetos e nitretos.

A análise microestrutural dos materiais na condição como recebida (Figuras 2 e 3) nos permite verificar que as três ligas são constituídas de uma microestrutura ferrítica-perlítica, diferindo somente significativamente no tamanho de grão ferrítico entre os materiais, onde a Liga 2 (Figura 2b) tem um tamanho de grão significativamente maior que as Ligas 1 e 3 (Figuras 2a,c).

Ao observar-se as mudanças microestruturais nos aços em estudo antes (Figura 2) e após o processo de laminação a quente em escala piloto (Figura 4), pela presença

de grãos alongadas e bandas de deformação, confirmam-se as evidências destes aços terem sido laminados nos últimos passes em temperaturas abaixo da T_{NR} . Estas características apresentadas pelos aços em estudo são evidências claras que a presença de diferentes percentuais de elementos endurecedores por solução sólida (Mn, Si, Nb) fazem com as três ligas tenham comportamentos distintos a cada passe de redução. Até que no último passe (F3 – temperatura entre 970°C e 950°C) a resistências a deformação a quente dos três materiais se igualam, onde este comportamento pode estar associado ao aumento na fração de precipitados que se formam pela precipitação induzida por deformação, devido aos teores de elementos microligantes (neste caso Nb) associados aos percentuais de C e N.

5 CONCLUSÃO

Com relação aos resultados obtidos no presente estudo, referente ao comportamento mecânico de aços de baixo carbono contendo Mn e Si microligados ao Nb na laminação a quente em escala piloto, podemos concluir que:

- a resistência à deformação a quente durante o processo de laminação a quente é uma função da presença e quantidade elementos endurecedores em solução sólida durante as etapas de mais elevada temperatura, o que faz da Liga 1 a mais resistente de forma geral nos primeiros passes.
- o início da precipitação induzida por deformação pela formação de carbonetos/carbonitretos de Nb faz com que a resistência à deformação a quente das três ligas se torne aproximadamente iguais para as três ligas no último passe de redução (F3).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte financeiro da FAPERJ e da UniFOA, e a CSN pelo fornecimento de material e infraestrutura para processamento do mesmo.

REFERÊNCIAS

- 1 LAASRAOU, A.; JONAS, J.J. *Prediction of Temperature Distribution, Flow Stress and Microstructure during the Multipass Hot Rolling of Steel Plate and Strip*, ISIJ International, Vol. 31 (1991), No. 1, pp. 95-105.
- 2 KWO, O. Review - *A Technology for the Prediction and Control of Microstructural Changes and Mechanical Properties in Steel*, ISIJ International, Vol. 32 (1992), No. 3, pp. 350-358.
- 3 FERRER, M. H. *Estudo das transformações de fases de aços TRIP ao Si e Mn microligados com Nb*. (Tese de Doutorado) – USP, 2003.
- 4 PADILHA, A.F.; SICILIANO, F. *Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura* – 3.ed.-São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.
- 5 BORDIGNON, P.P.; CARNEIRO, T.; TAGUSAGAWA, S.; HULKA, K. *Usos e usuários finais de nióbio*. (Artigo) - Defesa@net, 2005.
- 6 GERMANO, R.L.S; *Aplicação de Tratamentos Termomecânicos Simulativos de Laminação de Tiras a Quente a Aços ARBL Si-Mn e Si-Mn-Nb*. (Dissertação de Mestrado) – UFRJ, 1991.
- 7 GORNI, A.A; SILVEIRA, J.H.D.; REIS, J.S.S. *Um Panorama do Desenvolvimento Recente de Chapas Grossas e suas Aplicações*. Corte e Conformações de Metais, 2006.

- 8 MARTINS, C.A. *Efeitos de microadições de Nb e Ti na estrutura e propriedades mecânicas de um aço conformável submetidos a tratamentos termomecânicos.* (Dissertação de Mestrado) – UFRJ, 1995.
- 9 FERREIRA, M.C.C. *Levantamento das curvas de resistência à deformação a quente, de aços de variadas composições químicas, laminados a quente pela CSN.* Volta Redonda, 2004. (Projeto de Graduação em Engenharia Metalúrgica) – EEIMVR, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda. 2004.