

DESENVOLVIMENTO DE AÇO LAMINADO A QUENTE DA CLASSE DE 900 MPa DE LIMITE DE ESCOAMENTO PARA APLICAÇÃO EM IMPLEMENTOS RODOVIÁRIOS*

Ailton Ribeiro de Avelar Júnior⁽¹⁾
Fábio Dian Murari⁽²⁾
Jonatas Venancio Barbosa⁽³⁾
Leonardo De Oliveira Turani⁽⁴⁾

Resumo

A indústria nacional de implementos rodoviários vem se transformando na última década com a utilização de aços de alta resistência em função das demandas por veículos mais leves e resistentes. A utilização de aços da classe de 900 MPa de limite de escoamento já é uma tendência para os próximos anos e a obtenção de propriedades mecânicas dentro desta especificação depende de controle rigoroso da composição química e das condições de processamento na laminação a quente. Dentro desse contexto, a Usiminas desenvolveu o aço laminado a quente USILN900. No presente trabalho são apresentados o desenvolvimento do aço, os valores de propriedades mecânicas, obtidos por meio de ensaios de tração, dureza, dobramento e Charpy, e as características microestruturais, avaliadas através de microscopia óptica e eletrônica de varredura.

Palavras-chave: Aços de alta resistência; Laminado a quente; Aços da classe 900 MPa; Implementos rodoviários.

DEVELOPMENT OF HOT ROLLED 900 MPa YIELD STRENGTH GRADE STEEL FOR APPLICATION IN ROAD IMPLEMENTS

Abstract

The national industry of road implements has been transformed in the last decade with the use of high strength steels due to the demands of lighter and more resistant vehicles. The use of 900 MPa yield strength grade steels is a trend for the next years and the attainment of mechanical properties within this specification depends on strict control of the chemical composition and hot rolling processing conditions. Within this context, Usiminas has developed the USILN900 steel as hot rolled. In the present work, the development of steel, the mechanical properties, obtained by tensile, hardness, bending and Charpy tests, and the microstructural characteristics, evaluated through optical and scanning electron microscopy, are presented.

Keywords: High strength steels; Hot-rolled; Steels of 900 MPa grade; Road implements.

¹ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., CQE/ASQ, Engenheiro de Produto Pleno, Controle Integrado do Produto, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, D. Sc., Pesquisador Especialista, Centro de Pesquisa Usiminas, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Mestrando em Metalurgia Física, CQE/ASQ, Engenheiro de Produção Pleno, Gerência Técnica de Laminado, Usiminas, Ipatinga, MG, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., MBA, CQE/ASQ, Especialista de Produto Pleno, Atendimento ao Cliente, Garantia da qualidade e Produto, Usiminas, Belo Horizonte, MG, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

A indústria nacional tem despendido recursos em pesquisa e desenvolvimento de aços de elevada resistência, visando atender requisitos de qualidade cada vez mais desafiadores exigidos pelo setor de implementos rodoviários. Após a consolidação do aço laminado a quente da classe de 700 MPa de limite de escoamento (LE) mínimo, a utilização de aços da classe de 900 MPa já é uma tendência para os próximos anos.

Existe um interesse especial nos aços de alta resistência, pois com a sua utilização consegue-se uma redução do peso e um aumento da performance dos equipamentos e veículos. Além disso, esses aços atendem aos requisitos de conformabilidade e soldabilidade necessários para sua aplicação.

Os aços de alta resistência apresentam diferentes tipos de microestruturas, dependendo da composição química e das condições de laminação a quente utilizadas. Por isso, para se conseguir as propriedades mecânicas especificadas é necessário um controle restrito do processo. Entre os principais constituintes encontrados na microestrutura desses aços destacam-se a ferrita, perlita, bainita e martensita [1].

A composição química dos aços de alta resistência contém teor de carbono relativamente baixo e adições de silício, manganês, cromo, vanádio, titânio e/ou nióbio [2]. Em relação às condições de laminação a quente, é necessária uma atenção particular para a temperatura e o tempo de reaquecimento de placas, temperatura de saída do trem acabador de tiras a quente (acabamento) e temperatura final de resfriamento após a laminação (bobinamento).

Para atender à demanda dos clientes que utilizam aços da classe de 900 MPa de limite de escoamento mínimo é necessário disponibilizar produtos laminados a quente em uma faixa de espessura de 2,00 mm a 6,00 mm. Este é um desafio, pois o aumento da espessura dos produtos geralmente provoca uma redução dos valores de limite de escoamento e limite de resistência (LR), para uma mesma composição química e condições de processamento similares na laminação a quente [3].

Uma das principais aplicações do aço de alta resistência da classe de 900 MPa de limite de escoamento é em fueiros leves, já utilizados no mercado sul-americano, conforme mostrado na figura 1.



Figura 1. Exemplo da aplicação do aço de alta resistência da classe de 900 MPa de limite de escoamento.

Neste sentido, este trabalho teve como objetivo apresentar o desenvolvimento do aço laminado a quente USILN900 pela Usiminas, os valores de propriedades mecânicas, obtidos por meio de ensaios de tração, dureza, dobramento e Charpy, assim como as características microestruturais desse novo produto, avaliadas por meio de microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Metodologia

No trabalho proposto, a produção da corrida e o processo de laminação a quente foram realizados em escala industrial. Na tabela 1 é mostrada a composição química utilizada no desenvolvimento do aço USILN900. Foram utilizadas seis placas com espessura de 250 mm para a realização dos testes.

Tabela 1. Composição química (% massa) do aço de alta resistência avaliado.

C	Mn	Si	Al	P	S	Nb	Ti	V	Mo
≤	≤	≤	≥	≤	≤	≤	≤	≤	≤
0,20	2,20	0,60	0,015	0,025	0,010	0,090	0,25	0,20	1,00

Foram visados os valores de temperatura de reaquecimento de placas (T_{RP}) $\geq 1160^{\circ}\text{C}$, tempo de reaquecimento (t_{RP}) ≥ 160 min, temperatura de acabamento (T_A) $\geq 830^{\circ}\text{C}$ e temperatura de bobinamento (T_B) $\leq 600^{\circ}\text{C}$, dentro da capacidade da linha de Tiras a Quente da Usiminas, conforme figura 2. As placas foram laminadas de 250 mm para 3,00, 4,75 e 6,00 mm, espessuras solicitadas pelos clientes.

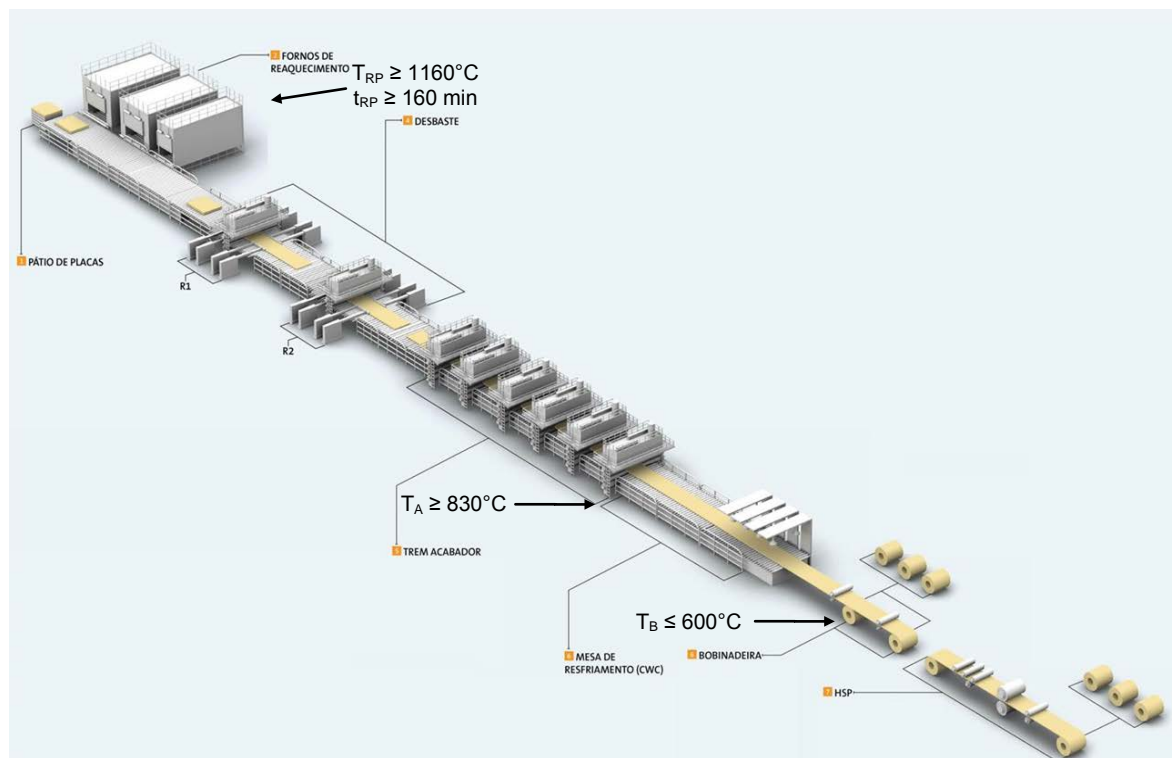


Figura 2. Ilustração esquemática da Linha de Tiras a Quente da usina de Ipatinga da Usiminas.

De cada bobina produzida foi retirada uma amostra nas posições início (topo), meio e final (base) do comprimento e a $\frac{1}{4}$ da largura da tira. De cada amostra foram retirados corpos de prova (CPs) para realização dos ensaios de tração, orientados transversalmente (C) e longitudinalmente (L) em relação à direção de laminação. Os ensaios de tração foram realizados com base de medida proporcional. Os constituintes microestruturais presentes em cada amostra foram identificados através de MO e MEV, após ataque com o reagente nital.

Os ensaios de dobramento, dureza, e Charpy foram realizados em amostras retiradas na posição base do comprimento e a $\frac{1}{4}$ da largura da tira.

Os ensaios de dobramento foram realizados com CPs orientados transversalmente até o ângulo de 90° , com calço (3E).

Os testes de dureza foram realizados na escala Vickers, com carga de 10 kgf (HV_{10}), em três posições sobre a face da espessura da tira.

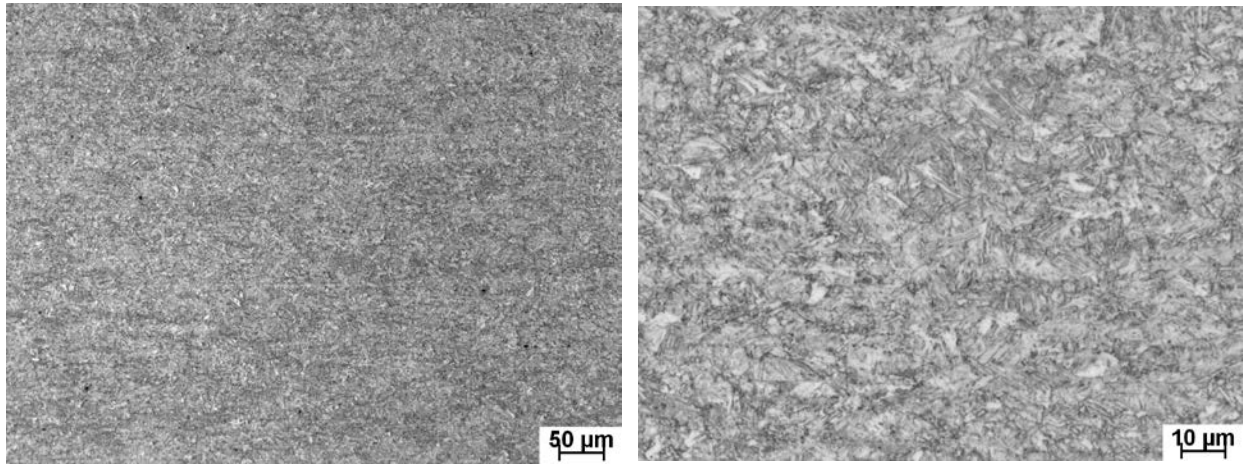
Os ensaios de Charpy foram realizados em três CPs, orientados longitudinalmente e com temperatura de -40°C .

2.2. Resultados e Discussão

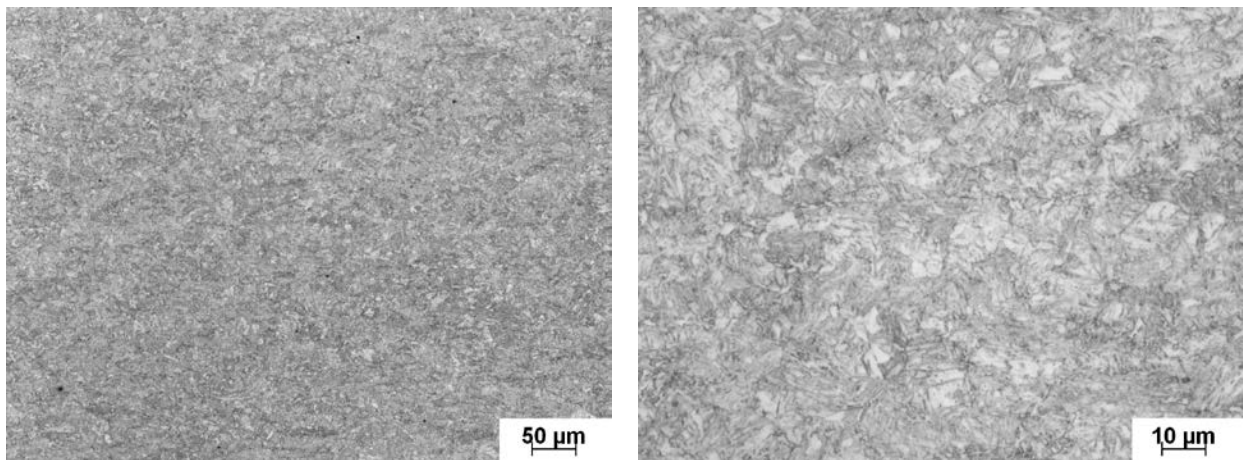
2.2.1. Microestrutura

Observou-se para as amostras de 3,00, 4,75 e 6,00 mm uma microestrutura bastante refinada e homogênea ao longo da espessura, formada predominantemente por constituintes de baixa temperatura de transformação, conforme mostrado na figura 3.

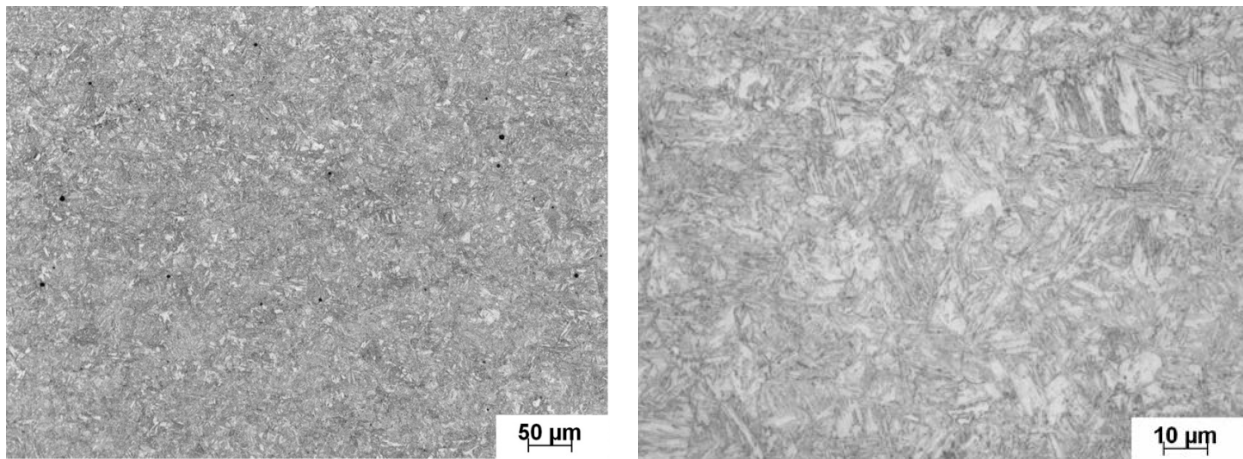
Na figura 4 é possível observar, com mais detalhes, as características dos microconstituintes formados. Para as três espessuras analisadas, verificou-se principalmente a presença de martensita (M), bainita (B) e pequena quantidade de ferrita (F).



a) 3,00 mm



b) 4,75 mm



c) 6,00 mm

Figura 3. Aspecto microestrutural das amostras com espessuras de 3,00, 4,75 e 6,00 mm. Ataque: Nital 4%, $\frac{1}{4}$ da espessura. (MO).

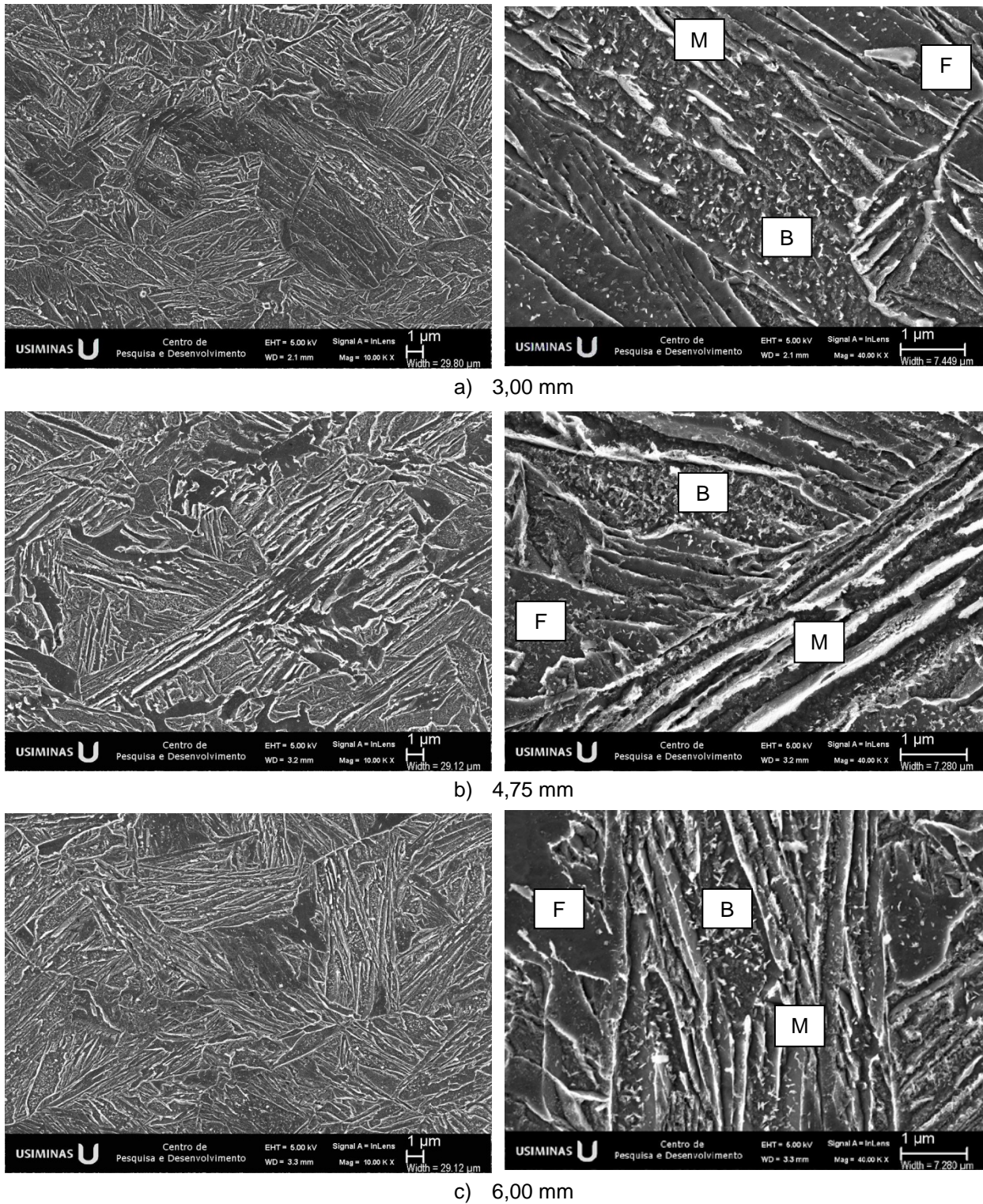
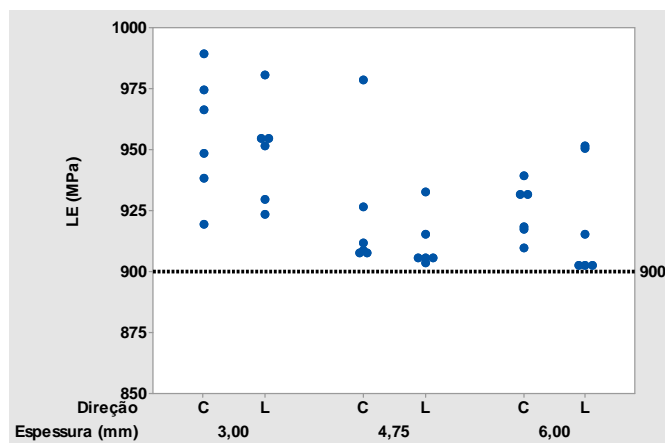


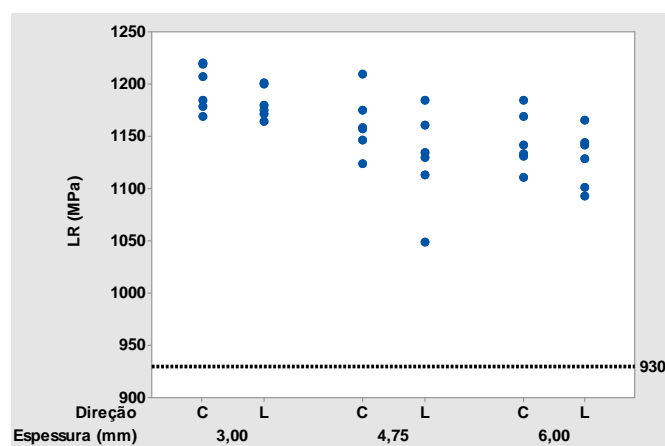
Figura 4. Aspecto microestrutural das amostras com espessuras de 3,00, 4,75 e 6,00 mm observado via microscópio eletrônico de varredura. Ataque: Nital 2%, $\frac{1}{2}$ da espessura. (MEV)

2.2.2. Propriedades Mecânicas

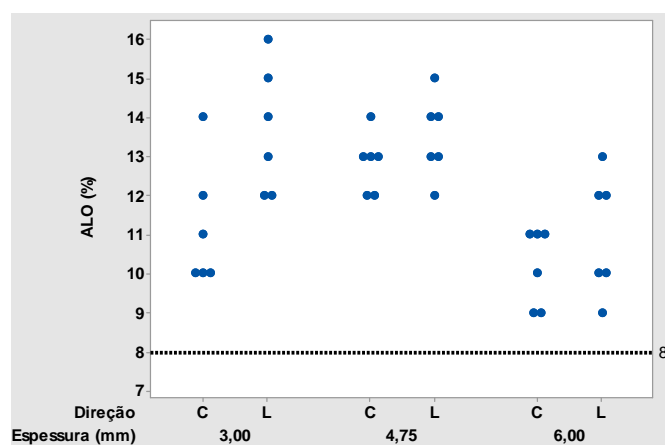
As propriedades mecânicas em tração obtidas são mostradas na figura 5. As linhas horizontais tracejadas indicam os valores mínimos especificados pela norma DIN EN 10149-2 [4]. Para as três espessuras avaliadas, os valores de LE, LR e alongamento total (ALO) se situaram acima dos respectivos valores mínimos especificados, para as direções C e L.



a)



b)



c)

Figura 5. Propriedades mecânicas em tração a) LE, b) LR e c) ALO obtidas para o aço USILN900.

Na figura 6 é mostrado um exemplo do gráfico de Tensão x Deformação do ensaio de tração realizado em uma amostra do aço USILN900. O material apresentou LR e ALO dentro da especificação, conforme valores de referência da figura 5.

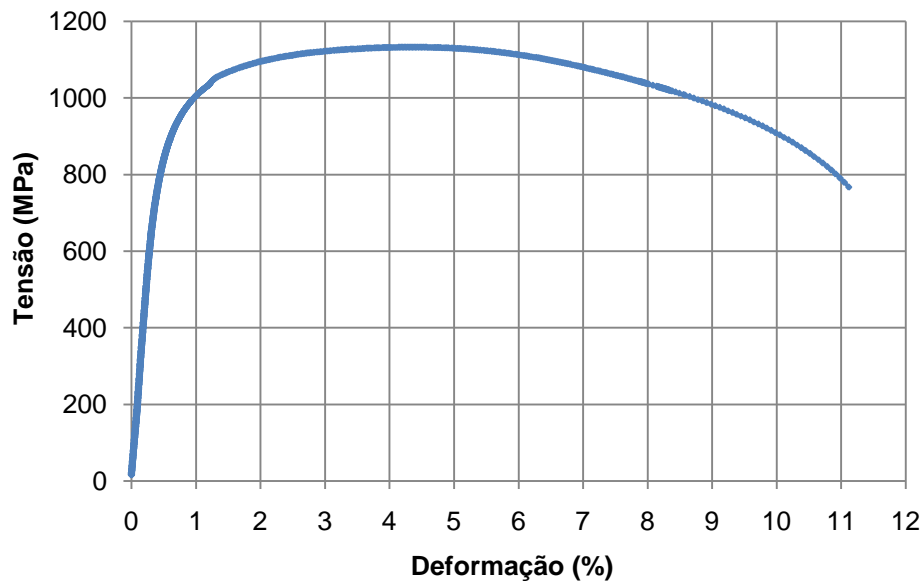


Figura 6. Gráfico Tensão x Deformação do ensaio de tração de uma amostra do aço USILN900.

Todos os CPs testados em dobramento foram aprovados, não apresentando trincas visíveis após os ensaios, conforme mostrado na figura 7.



Figura 7. Aspecto de corpo de prova de aço USILN900 após ensaio de dobramento.

Os resultados de dureza são mostrados na figura 8. Como se pode notar, todos os valores obtidos se situaram dentro da faixa especificada para o aço em questão.

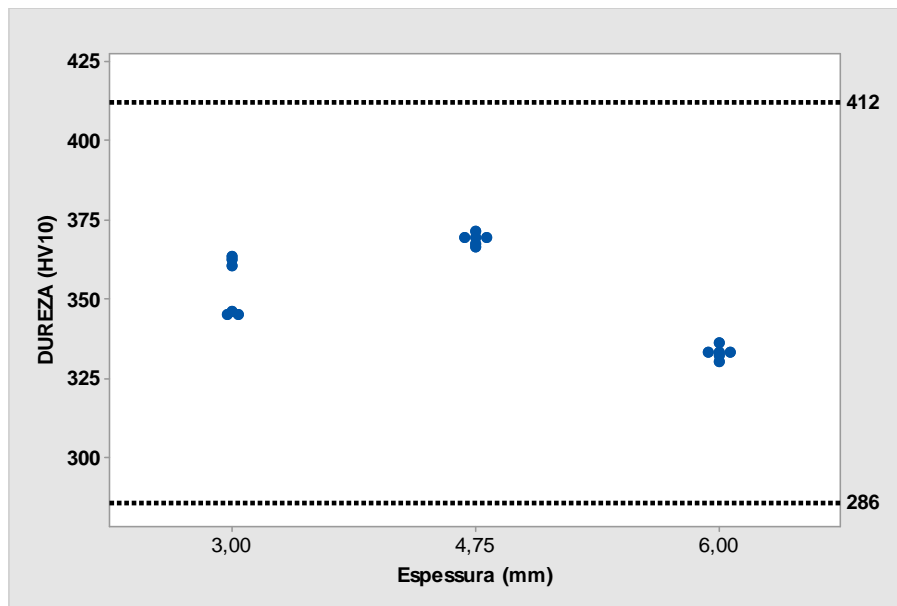


Figura 8. Resultados de dureza obtidos para o aço USILN900.

Os resultados de energia absorvida em ensaio Charpy a -40°C são mostrados na figura 9. Devido à espessura do produto não possibilitar a realização do ensaio com corpo de prova padrão, estes foram preparados com espessuras reduzidas e a energia corrigida proporcionalmente. Para todas as espessuras avaliadas, a energia absorvida considerando o corpo de prova de $10 \times 10 \text{ mm}$ foi superior ao valor especificado (27J).

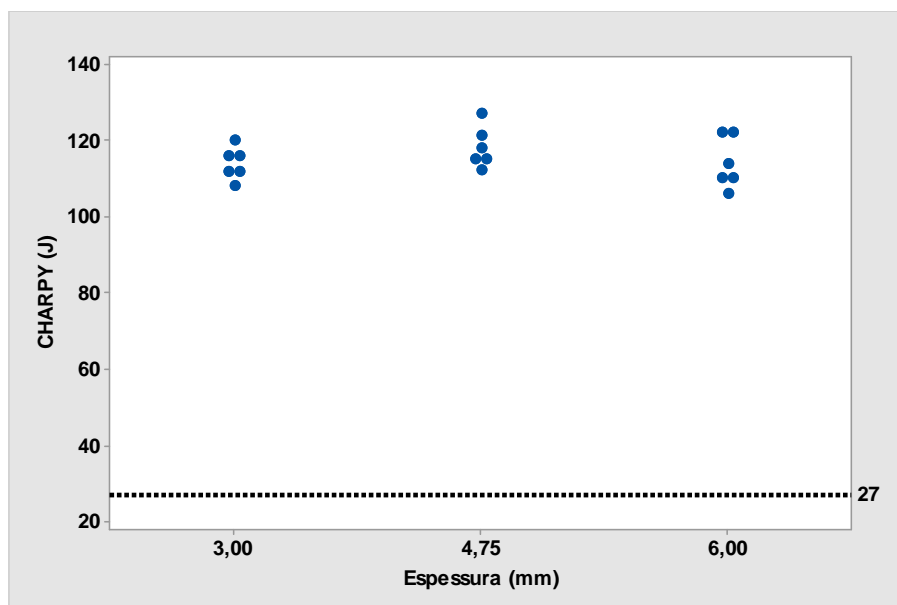


Figura 9. Resultados de energia absorvida em ensaio de impacto Charpy para o aço USILN900.

2.2.3. Aspecto Final dos Produtos

Na figura 10 é mostrado um exemplo do aspecto de uma das bobinas do aço USILN900 após o processo de laminação a quente.



Figura 10. Aspecto de uma das bobina do aço USILN900.

Em função dos elevados valores de limite de escoamento, a bobina foi processada em uma linha de desempenho e corte transversal, com recursos de laminação superficial para alívio de tensões, a fim de se obter chapas com planicidade adequadas às aplicações finais. As chapas obtidas após o corte transversal são mostradas na figura 11.



Figura 11. Aspecto de chapas do aço USILN900 após corte transversal.

Em sequência, as chapas foram aplicadas em processo de fabricação de feiros cujos resultados de corte longitudinal, dobramento e solda têm se mostrado satisfatórios. Estudos sobre o desempenho na fadiga e sobre dureza na zona termicamente afetada no processo de soldagem deverão ser conduzidos no sentido

de complementar o conhecimento da aplicação do aço USILN900 na indústria de implementos rodoviários.

3. CONCLUSÃO

Visando atender ao mercado de implementos rodoviários a Usiminas desenvolveu o USILN900, aço laminado a quente da classe de 900 MPa de limite de escoamento mínimo.

Com a composição química e condições de processamento utilizadas na laminação a quente foram obtidos resultados de propriedades mecânicas em tração, dobramento, dureza e energia absorvida em ensaio de impacto Charpy dentro das faixas especificadas pela norma DIN EN 10149-2.

Foi observada uma microestrutura bastante refinada e homogênea ao longo da espessura, com a presença principalmente de martensita, bainita e pequena quantidade de ferrita.

A planicidade das chapas após o desempenho e corte transversal foi considerada satisfatória.

Resultados de corte longitudinal, dobramento e soldagem de fueiros utilizando o aço USILN900 têm se mostrados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- 1 GUO, Aimin et al. Ultrahigh strength and low yield ratio of niobium-microalloyed 900MPa pipeline steel with nano/ultrafine bainitic lath. **Materials Science And Engineering: A**, [s.l.], v. 527, n. 16-17, p.3886-3892, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.02.067>.
- 2 ZHAO, Jingwei; JIANG, Zhengyi. Thermomechanical processing of advanced high strength steels. **Progress In Materials Science**, [s.l.], v. 94, p.174-242, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.01.006>.
- 3 Avelar Júnior, A. R. Influência das Condições de Laminação a Quente nas Propriedades Mecânicas de um Aço ARBL da Classe 700 MPa de Limite de Escoamento. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2013. 64p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica).
- 4 Hot rolled flat products made of high yield strength steel for cold forming - Part 2: Technical delivery conditions for thermomechanically rolled steel; DIN EN 10149-2, 2013. 15p.