

DESENVOLVIMENTO DO AÇO SAE 1070 NA ARCELORMITTAL TUBARÃO E ANÁLISE DA CONFORMABILIDADE ATRAVÉS DA RELAMINAÇÃO NA BRASMETAL WAEZHZOLZ¹

André Sereno Lopes²
Maurício Franco Bomfim³
Flávio José Saraiva Rodrigues⁴
Gabriel Godinho Alves⁴
Ralph Telles dos Anjos⁵
Carlos Alberto Perim⁶
José Fagundes Júnior⁷

Resumo

Os aços alto carbono constituem um dos principais aços da indústria de ferramentas e utensílios devido as suas características de elevada resistência mecânica e ao desgaste. Como principais aplicações se encontram fitas de serra, lâminas de corte para a indústria agrícola entre outras ferramentas. A sua elevada resistência é proveniente do elevado teor de carbono, associado à adição de cromo, o qual proporciona a formação de carbeto. Dentro deste contexto a produção de aços alto carbono na indústria é caracterizado como um grande desafio, necessitando de um rigoroso controle de processo desde a etapa da aciaria na ArcelorMittal Tubarão até o processo de relaminação na Brasmetal. Este trabalho tem como objetivo apresentar o status de desenvolvimento do aço SAE 1070 (BW AC C70), na ArcelorMittal Tubarão e Brasmetal, como relaminado, objetivando o atendimento às demandas do mercado de ferramentas e utensílios. Serão apresentados os principais controles realizados nas diversas etapas de produção, bem como a análise da conformabilidade na etapa de relaminação e os respectivos resultados de propriedades mecânicas e de microestruturas do produto.

Palavras-chave: Aço; SAE1070; ArcelorMittal Tubarão; Brasmetal Waelzholz.

DEVELOPMENT OF HIGH CARBON STEEL, CLASS SAE1070, AT ARCELORMITTAL TUBARÃO AND FORMABILITY ASSESSMENT THROUGH THE REROLLING AT BRASMETAL WAEZHZOLZ

Abstract

The high carbon steels are the major steel industry tools and utensils due to its characteristics of high strength and wear resistance. Main applications are saw blades, cutting blades for the agricultural industry among other tools. High strength requirement is achieved from high carbon content associated with chromium addition, which provides the formation of carbides. The production of high carbon steel in the industry is very difficult what require a strict process control from steelmaking to the re-rolling step. This work aims to present the development status of high carbon steels at ArcelorMittal Tubarão and Brasmetal, class SAE1070 and main controls carried out along the industrial production. It will be also showed the high carbon steel formability assessment at re-rolling process, main mechanical properties and microstructure results regarding to the product.

Key words: Steel; SAE 1070; ArcelorMittal Tubarão; Brasmetal Waelzholz.

¹ Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Mestre em Metalurgia, Gerente de Qualidade e Desenvolvimento, Brasmetal Waelzholz, SP, Brasil.

³ Engenheiro Metalurgista, Gerente de Planejamento, Brasmetal Waelzholz, SP, Brasil.

⁴ Mestres em Metalurgia, Especialistas Desenvolvimento Produtos, ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil.

⁵ Bacharel Ciências Contábeis, Especialista de Assistência Técnica, ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil.

⁶ Mestre em Metalurgia, Especialistas de Lingotamento Contínuo, ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil.

⁷ Mestre em Metalurgia, Especialistas de Laminação a Quente, ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os aços alto carbono vem se destacando como uma das classes de aços com crescente demanda devido a sua vasta amplitude de aplicações (Figura 1). Aspectos econômicos, ambientais, estratégicos e culturais têm sido pilares no desenvolvimento desta classe de aços. Dentre as principais características está a sua elevada resistência mecânica.



Figura 1. Algumas aplicações do aço alto carbono: lâminas para raspagem, molas de retorno, fitas de serras, desempenadeiras, espátulas, lâminas de corte para a indústria agrícola, calços de máquinas e equipamentos.

Hellmann e Sereno⁽¹⁾ descrevem que “a siderurgia alcançou grandes avanços no conhecimento técnico-científico e nos modos de fabricação, permitindo a fabricação dos aços alto carbono com elevada qualidade. Na área em destaque da Figura 2 podem ser visto, com teor de carbono entre 0,60% e 0,90%, diversos possíveis graus, que se diferenciam basicamente nos campos de aplicação e usos finais”.

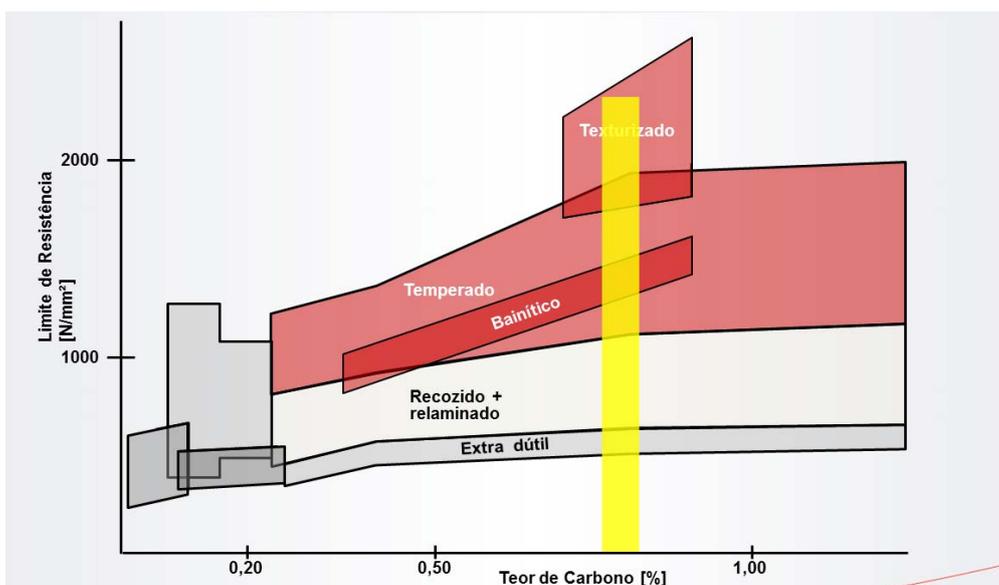


Figura 2. Faixa de materiais em função do teor de carbono e limite de resistência a tração.

1.1 Mecanismo de Formação

O entendimento pleno de aspectos importantes de aços alto carbono requer conhecimento de suas microestruturas típicas, como as mesmas se formam, como contribuem na definição das propriedades mecânicas, etc. Assim, nesta revisão bibliográfica buscou se aprofundar em conhecimentos gerais relativo a todos os aços que se encaixam na categoria de alto carbono. Os aços com estrutura perlítica, objeto de estudo deste trabalho, são tratados com mais ênfase.

1.1.1 Aços com alto teor de carbono

Segundo Krauss,⁽²⁾ aços com alto teor de carbono, tal como 1070-1095 são especialmente adequados para molas que requerem resistência à fadiga e manutenção da forma. Eles também são usados na condição quase completamente endurecido (55 HRC e superior) para aplicações em que a resistência à abrasão é uma exigência principal, como por exemplo implementos agrícolas.

1.1.2 Efeito dos elementos de liga

- Carbono - o carbono, que tem um grande efeito sobre as propriedades do aço, é o principal elemento de endurecimento em todos os aços. A resistência à tração na condição como laminados aumenta à medida que aumenta o teor de carbono (até cerca de 0,85% C). A ductilidade e soldabilidade diminuem com o aumento do carbono;⁽³⁾
- Manganês - ele contribui para a resistência e dureza, mas num nível inferior ao do carbono, a quantidade de aumento é dependente do teor de carbono. Aumentando o teor de manganês diminui a ductilidade e soldabilidade, mas em menor grau do que o carbono. O manganês tem um forte efeito sobre o aumento da dureza de um aço;⁽³⁾ e
- Cromo - o cromo estimula a formação de carbonetos, aumentando a resistência ao desgaste, bem como a temperabilidade aos aços, reduz a velocidade crítica de resfriamento. A adição de cromo torna mais fina a granulação dos aços, aumentando desse modo a sua resistência.⁽³⁾

1.1.3 Perlita

A perlita é constituída de lamelas alternadas aproximadamente paralelas, ou plaquetas, de ferrita (mole e dúctil) e cementita (dura e frágil), que resulta num composto de estrutura lamelar de duas fases. A Figura 3 mostra um exemplo de perlita formada num aço que contém carbono perto do ponto eutetóide, 0,77% em peso de carbono. Nesta micrografia eletrônica de varredura as lamelas de cementita são claras e as de ferrita são escuras.

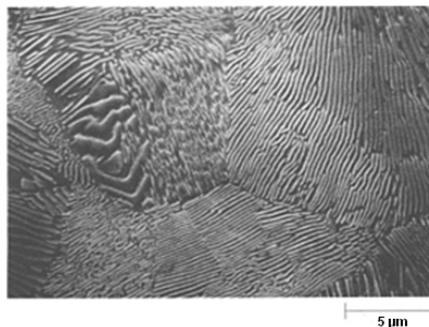


Figura 3. Microscopia Eletrônica de Varredura apresentando microestrutura de perlita num aço de composição eutetóide (0,77%C). Cortesia de F. Zia-Ebrahimi.

A Figura 4 apresenta o diagrama TRC de um aço eutetóide, superpondo-se a ele várias curvas de resfriamento de pequenas amostras do aço. Os resfriamentos segundo as curvas 1 e 2 produzirão uma microestrutura perlítica, objetivo do trabalho em questão. A partir da velocidade de resfriamento correspondente à curva 3, vê-se que não mais haverá condições para a transformação austenita => ferrita + cementita e, ao atingir a temperatura ambiente, a amostra terá sofrido a reação martensítica, segundo Brick et al..⁽⁴⁾

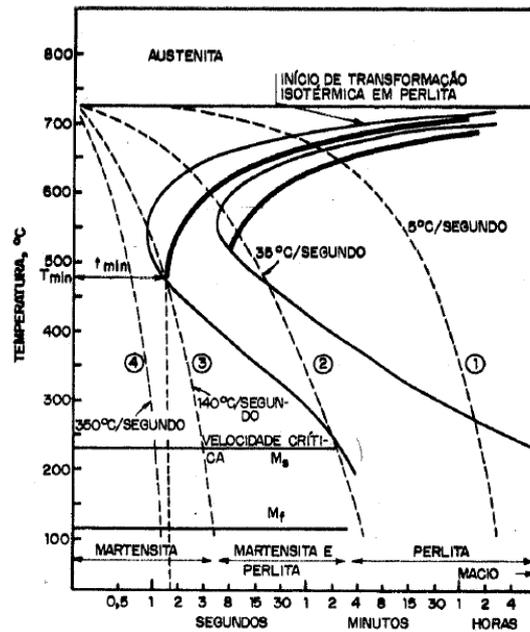


Figura 4. Diagrama de transformação isotérmica de um aço eutetóide, com a superposição de curvas de resfriamento de amostra de aço.

Em muitos livros a perlita têm sido descrita como camadas alternadas de ferrita e cementita. Segundo Bhadeshia,⁽⁵⁾ a perlita deve ser vista como uma colônia formada por um bi-cristal de cementita e ferrita interpenetrados entre si. Devido ao fato de existir na forma de colônia a diminuição da espessura das lamelas da perlita não aumenta significativamente a tenacidade, pois, uma eventual trinca continua podendo atravessar todo cristal sem desviar muito. Entretanto, a diminuição das lamelas implica no aumento da resistência.

• Espaçamento Interlamelar da Perlita

Segundo Gladman, Mcleivor e Pickering⁽⁶⁾ e Wu e Badeshia⁽⁷⁾ a resistência dos aços aumenta quanto menor o espaçamento interlamelar de lamelas de ferrita/cementita, ou seja, o espaçamento interlamelar da perlita é confirmado ser o principal parâmetro microestrutural que controla a resistência da perlita. Hyzak e Bernstein,⁽⁸⁾ estudaram um aço de microestrutura totalmente perlítica, contendo 0,81% C, onde foram avaliados não somente o efeito de espaçamento interlamelar perlita, S_0 , mas também o efeito do tamanho de grão austenítico, d , e o tamanho das colônias perlita, P , em propriedades mecânicas (Equação 1).

$$\text{Limite de resistência (MPa)} = 2,18(S_0^{-1/2}) - 0,40(P^{-1/2}) - 2,88(d^{-1/2}) - 52,30 \quad (\text{Eq. 1})$$

Levando em consideração à distância interlamelar, Langford,⁽⁹⁾ Modi et al.⁽¹⁰⁾ nos indicam que conforme se diminui a distância interlamelar de cementita contida no material observa-se, em geral, um aumento no limite de escoamento, limite de

resistência e de dureza, no entanto para o alongamento e resistência ao impacto observa-se o contrário (Figura 5), nas quais os autores mediram a variação das propriedades mecânicas com o inverso da raiz quadrada do espaçamento lamelar.

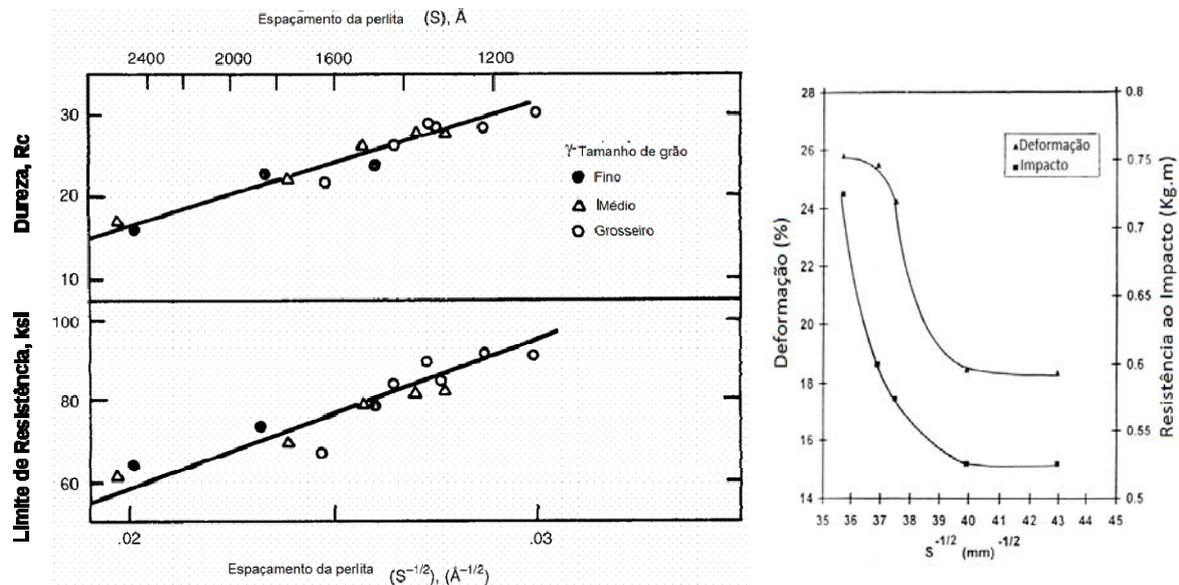


Figura 5. Limite de resistência (e de escoamento), dureza, alongamento (deformação) e resistência ao impacto em função do espaçamento interlamelar de perlita num aço totalmente perlítico.

Segundo Mei⁽¹¹⁾ a medida do espaçamento interlamelar da perlita, deve-se observar que o espaçamento real é o que apresenta o menor valor na tela do microscópio (Figura 6).

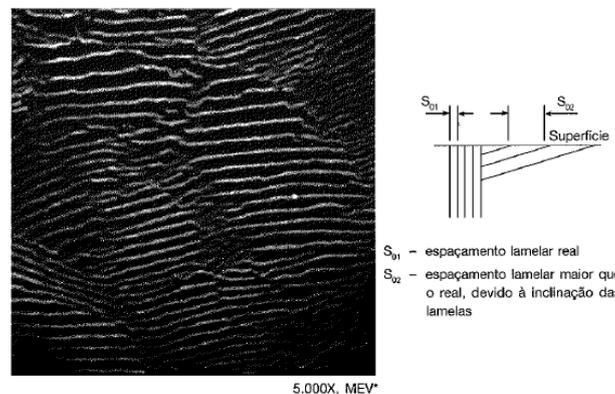


Figura 6. Nódulos de perlita com diferentes inclinações em relação à superfície de medida. Aço 0,8%C; 1%Mn. MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura.

Vários autores⁽¹²⁾ verificaram que a adição de elementos de liga nos aços pode aumentar ou diminuir o espaçamento interlamelar da perlita (S_0):

- Mn e Ni: Estabilizadores da austenita. Alto efeito no S_0 ;
- Si: Estabilizador da ferrita. Baixo efeito no S_0 ;
- Nb: Estabilizador da ferrita. Alto efeito no S_0 ;
- Cr: Estabilizador da ferrita. Não tem nenhum efeito no S_0 ;
- Co: Estabilizador da austenita. Baixo efeito no S_0 .

A perlita pode ser dividida em diversos graus em função do espaçamento interlamelar (S_0). A literatura separou no passado estes graus em: Perlita, Sorbita e

Trostita. Sendo a primeira mais grosseira e a última mais fina. Conforme Modi et al.,⁽¹⁰⁾ estes graus de perlita possuem as seguintes características (Tabela 1).

Tabela 1. Variação das propriedades mecânicas em um aço perlítico

Microestrutura	Dureza [HB]	Distância interlamelar [μm]
Perlita	180	0,60 – 0,70
Sorbita	250	Aproximadamente 0,25
Trostita	400	0,03 - 0,10

1.2 Processamento dos Aços Alto carbono – Principais Controles

1.2.1 Aciaria

A garantia dos níveis de limpidez do aço, qualidade superficial, sanidade interna, composição química e seus requisitos dimensionais e de forma se mostram essenciais para a obtenção de placas com elevada qualidade. Para isto torna-se necessário a utilização de diversos controles de processo durante a produção na aciaria, incluindo a rota metalúrgica até as condições dos equipamentos produtivos (Convertedor, Refino Secundário e Lingotamento Contínuo).

1.2.2 Resfriamento em bobinas laminadas a quente

Estudos realizados por Ryu e Lee⁽¹³⁾ mostram que a obtenção de uma microestrutura perlítica uniforme ao longo de toda bobinas laminadas a quente depende de um rigoroso controle de resfriamento durante a etapa de laminação a quente. Esta uniformidade da microestrutura é de suma importância para assegurar um ótimo desempenho do produto nos processos subsequentes.

1.2.3 Relaminação

Aços com teor de carbono, como o do aço SAE 1070, que será aqui denominado BW AC C70, que apresenta 0.7% de carbono apresentam dificuldade de laminação comparada com outros aços convencionais. Isso se dá devido ao fato de que o material possui uma microestrutura perlítica. Esta por sua vez pode apresentar comportamento frágil com a deformação o que limita a redução máxima. Para que seja possível obter maiores reduções, pode-se limitar a redução por passe tendo etapas de recozimento e alívio de tensão entre cada passe sucessivo até que se chegue na espessura final, conforme Humphreys e Matherly.⁽¹⁴⁾ Para que haja esta vantagem para o processo de relaminação, faz-se necessário que a microestrutura esteja homoganeamente distribuída ao longo do comprimento e largura das bobinas laminadas a quente, visto que a homogeneidade de microestrutura perlítica modifica claramente as propriedades mecânicas do material, conforme Korda et al.,⁽¹⁵⁾ Karlsson e Lindén.⁽¹⁶⁾ O aço BW AC C70 laminado a quente com estrutura perlítica fina, possibilita maiores reduções de espessura, o que pode enfim possibilitar a eliminação de processo de recozimentos intermediários, que normalmente seriam necessários para estruturas perlíticas mais grossas.

O objetivo deste trabalho é relatar o desenvolvimento de aço de alto teor de carbono de origem de laminação à quente na AM Tubarão. Também se objetiva melhorar a aptidão à relaminação do material BW AC C70. Para isto será realizada uma análise do aço laminado a quente fornecido pela ArcelorMittal Tubarão e como relaminado na Brasmetal. A análise será feita em termos de microestrutura e aptidão à relaminação.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Fluxo de Produção de Bobinas Laminadas a Quente – Escala Industrial

A Figura 7 apresenta o fluxo de produção da ArcelorMittal Tubarão para 7,5 milhões de toneladas/ano. Destaca-se para a produção do aço alto carbono, a utilização de desgaseificadores a vácuo na aciaria (limpidez), uso de Lingotamento contínuo com molde curvo (sanidade interna) e um controle rigoroso nos parâmetros metalúrgicos de laminação.

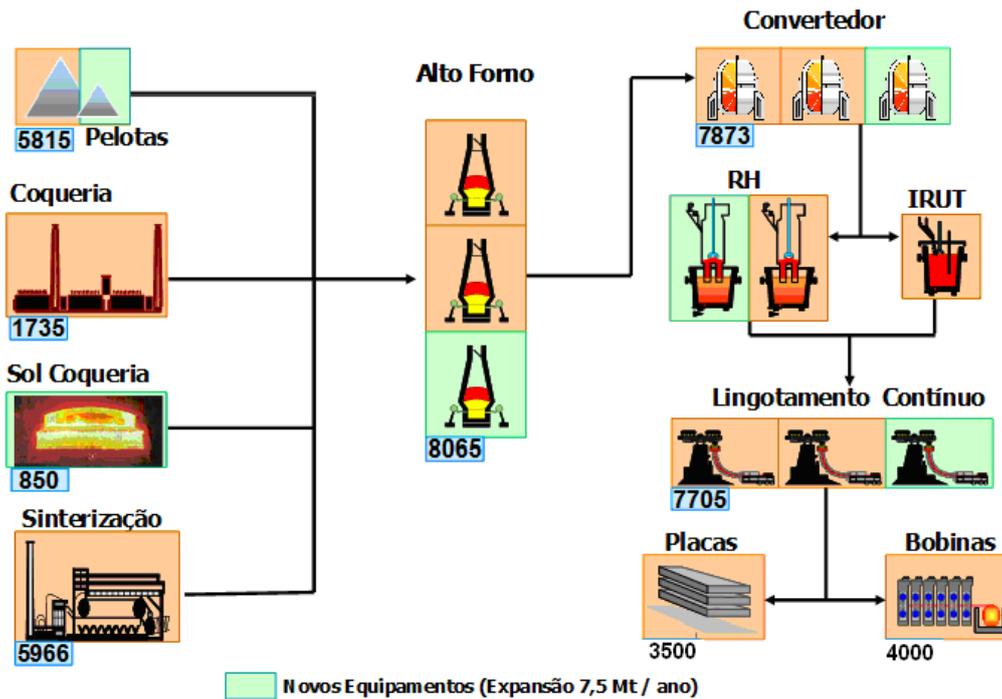


Figura 7. Fluxo produtivo na ArcelorMittal Tubarão.

2.2 O Sistema de Controle de Qualidade de Bobinas

Visando o monitoramento da qualidade superficial, dimensional e de forma das bobinas laminadas a quente é utilizado na ArcelorMittal Tubarão o Sistema de Controle de Qualidade de Bobinas. A arquitetura funcional do sistema de julgamento da qualidade de bobinas também está fundamentada na coleta de dados (manual e automática), julgamento e tratamento das não-conformidades. A Figura 8 apresenta os principais sistemas de medição existentes no processo. Destaca-se o sistema de inspeção superficial "on line" do LTQ.

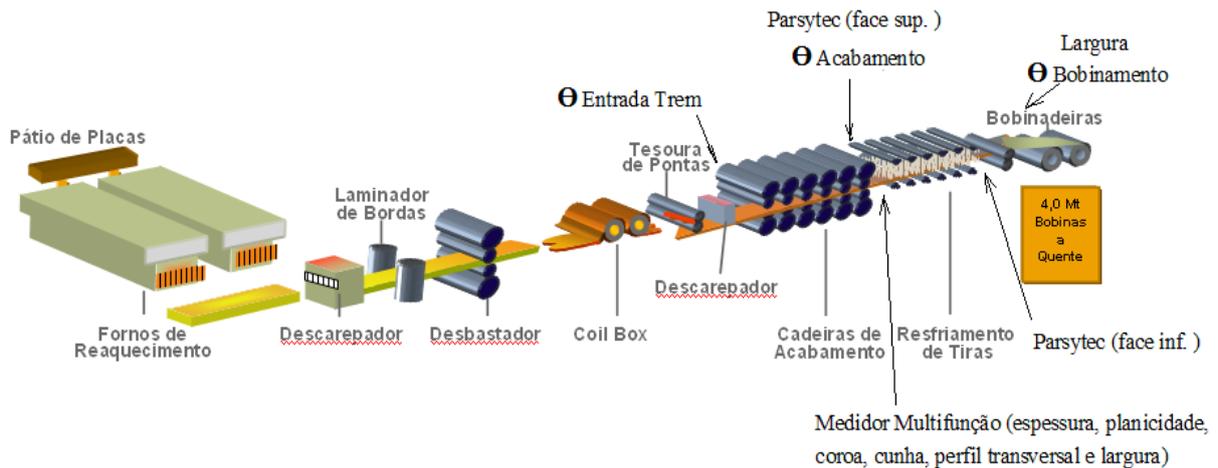


Figura 8. Malha de controle da qualidade de bobinas a quente (principais pontos de medição)

2.3 Laminador de Tiras a Quente

O laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão tem uma capacidade de produção anual de 4,0 milhões de toneladas. As bobinas podem ser produzidas com espessuras entre 1,2 e 19 mm e largura de 700 a 1880 mm. Mesa de resfriamento da tira com comprimento total de 105 m, com sistema de resfriamento forçado tipo “Laminar flow” (Figura 9).



Figura 9. Mesa de resfriamento do laminador de tiras a quente da ArcelorMittal Tubarão.

O controle das temperaturas de acabamento e de bobinamento, associado a uma estratégia de resfriamento adequada no “laminar Flow” do laminador de tiras a quente permite a obtenção de uma microestrutura “Perlítica Fina”, sendo esta objetivada para os processos subseqüentes e finalmente para atendimento às propriedades mecânicas finais do produto.

2.4 Material de Estudo

Aço A: BW AC C70, fornecido pela AM Tubarão.

O aço A foi laminado a quente na ArcelorMittal Tubarão até a espessura nominal de 6,30mm e largura nominal de 1.250mm. A composição química deste aço foi determinada através de espectrometria ótica, citada na Tabela 2.

O aço foi relaminado na Brasmetal. conforme o seguinte processo:

Decapagem química → corte inicial para a largura de 575 mm, laminação final com redução de espessura de 36% → recorte final.

As microestruturas do material foram determinadas via microscópio ótico, utilizando um aumento de 1.000x. Para a determinação do espaçamento interlamelar foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV) com aumento 10.000x, de acordo com o seguinte procedimento, conforme Silva:⁽¹⁷⁾

- corte na seção transversal da amostra;
- embutimento, lixamento e polimento;
- ataque para revelar a perlita utilizando-se o reagente Nital 2%;
- determinação do espaçamento interlamelar em vários pontos aleatórios;
- determinação de um campo onde a perlita estava transversal ao plano de corte. Consideraram-se os campos com a menor distância entre as lamelas de ferrita;
- traçou-se uma linha com comprimento conhecido e dividiu-se o comprimento desta linha pelo número de lamelas de cementita cortadas pela linha. O comprimento interlamelar considerado foi o resultado desta divisão.

3 RESULTADOS

3.1 Análise Química – Aço A

O aço A apresentou a seguinte composição química (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados de composição química do aço A (% em peso - panela)

C	Mn	P	S	Si	Al	Cr
0,727	0,710	0,013	0,008	0,215	0,061	0,212

3.2 Análise Via Baumann – Aço A

Foi vazada corridas experimental na AM Tubarão, cujas placas apresentaram boa qualidade interna e ausência de trincas térmicas superficiais avaliadas via Baumann, Figura 10.

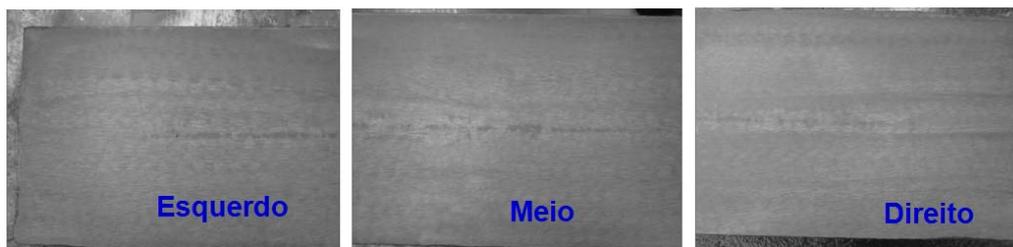


Figura 10. Resultados de Baumann da qualidade BW AC C70 - transversal ao sentido de lingotamento.

3.3 Laminação a Quente – Aço A

As bobinas provenientes do aço A foram laminadas sem anormalidades no LTQ da AM Tubarão. Não foram observados defeito de forma (ovalização) e nem defeitos superficiais (corpo e bordas) (Figura 11).

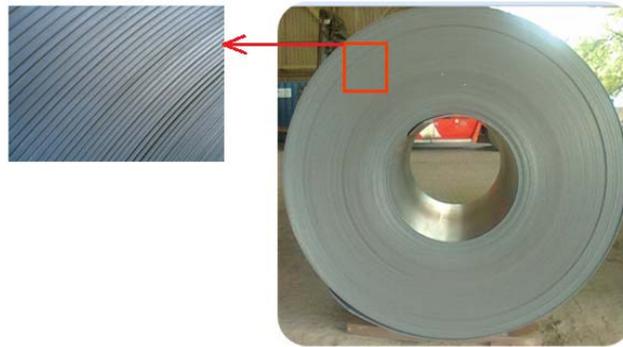


Figura 11. Bobina a quente (BQ) após laminação na AcelorMittal Tubarão.

3.4 Ensaio Mecânico – Aço A

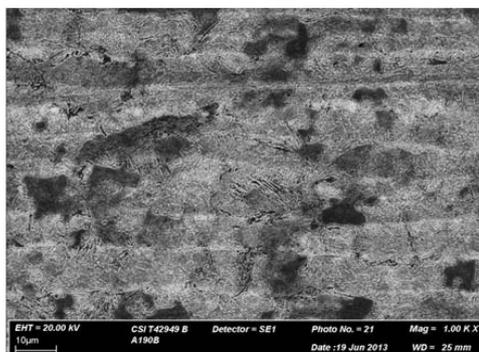
As propriedades mecânicas do laminado a quente foram caracterizadas através de ensaio de tração e dureza. Os valores encontrados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados de ensaio mecânico (tração e dureza). Sentido: Longitudinal

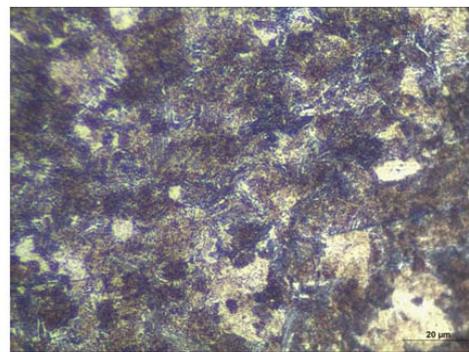
Limite de resistência (N/mm ²)	Limite de escoamento (N/mm ²)	Alongamento (% A80)	Dureza (HRc)
1000	700	7,8	28

3.5 Análise Metalográfica - Aço A

Na condição como laminado a quente, o material apresentou microestrutura homogênea constituída de colônias de perlita fina (Figura 12), apresentando o menor espaçamento interlamelar médio na ordem de 0,110 μm (Figura 13).

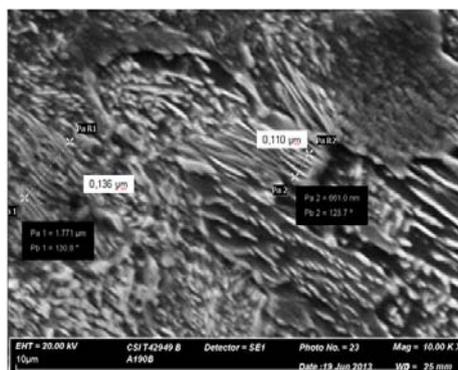


MEV. Aumento 1.000 x



Microscópio Ótico. Aumento 1.000 x.

Figura 12. Microestrutura aço A espessura 6,30 mm. Ataque Nital 2%.



MEV. Aumento 10.000 x

Figura 13. Menor espaçamento interlamelar médio de 0,110 μm . Ataque Nital 2%.

3.6 Desempenho na Relaminação – Aço A

No processo de decapagem a bobina laminada à quente proveniente da ArcelorMittal Tubarão teve ótimo desempenho. Os parâmetros de processo aplicados, como velocidade e temperaturas dos tanques, foram os típicos para o aço BW AC C70. Não houve quaisquer ocorrências de defeitos superficiais ou dificuldades para a remoção da camada de óxido. No processo de corte inicial para adequação da largura do rolo à capacidade de largura da cadeira de laminação da Brasmetal, foram aplicados parâmetros de corte típicos da qualidade e espessura, sem anomalias ao processo. No processo de relaminação a relação “redução de espessura porcentual e encruamento” do material testado foi de aproximadamente 5N/mm² por ponto porcentual de redução de espessura. Nesta etapa ocorreram leves trincas de bordas com largura máxima de 10 mm. Estas trincas, típicas de processo de relaminação, foram eliminadas na etapa posterior de recorte final. As propriedades mecânicas alcançadas estão descritas na Tabela 4:

Tabela 4. Resultados de ensaio mecânico (tração e dureza). Sentido: Longitudinal

	Limite de resistência (N/mm²)	Limite de escoamento (N/mm²)	Alongamento (% A80)	Dureza (HRc)
Encontrado	1179	1062	2,0	32
Objetivado	-	>900	-	>30

4 DISCUSSÕES

- Apesar das ocorrências de trincas leves de bordas, o material testado atendeu plenamente os requisitos de conformabilidade. Essas trincas foram provenientes do corte inicial, porém estas condições de processo e produto atenderam aos padrões típicos;
- A relação de redução de espessura porcentual e encruamento do material testado (5N/mm²/% red. esp.) está diretamente associado ao espaçamento interlamelar da perlita e adequado para o processo de relaminação deste tipo de material;
- A dureza encontrada de 28HRc na condição de laminado à quente corresponde a aproximadamente 278HB conforme conversão da ISO18265 Tabela B.2, o que classificaria a perlita como fina sorbita. Houve também ótima correlação entre a dureza encontrada e o espaçamento interlamelar de 0,110µm. Os valores de dureza e espaçamento interlamelar encontrados condizem com os citados na literatura; e
- No processo de relaminação, o material testado possibilitou a eliminação de recozimento intermediário para alcançar a redução aplicada na espessura de 36%.

5 CONCLUSÕES

- Os resultados de propriedade mecânica e microestrutura do aço alto carbono BW AC C70 se mostraram adequados aos processos de relaminação, quando comparados aos requisitos objetivados, entre eles, dureza do produto final, microestrutura perlítica com espaçamento interlamelar fino;
- Durante o processo de conformação na Brasmetal, o material testado apresentou uma elevada relação de redução de espessura porcentual e

encruamento, a qual foi conseguida devido a um adequado espaçamento interlamelar da perlita;

- O aço BW AC C70 laminado a quente produzido na AM Tubarão, constituído de uma microestrutura perlítica fina, possibilitou maiores reduções de espessura no processo de relaminação na Brasmetal, acarretando a eliminação do processo de recozimentos intermediários.

REFERÊNCIAS

- 1 HELLMANN, M. e SERENO, A. Um só aço diversas aplicações. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 49., 2012, Vitória. Anais. Espírito Santo: ABM, 2012, p. 893-903.
- 2 KRAUSS, G. Physical Metallurgy and Heat Treatment of Steel, in Metals Handbook Desk Edition, H.E. Boyer and T.L Gall, Ed., American Society for Metals, 1985, p. 28-2 to 28-10.
- 3 "Carbon and Alloy Steels" SAE J411, 1989 SAE Handbook, Vol 1, Materials, Society of Automotive Engineers, p. 2.01-2.03.
- 4 BRICK, R. M. et alli. Structure and properties of alloys. 3ª ed. New York. McGraw-Hill Book Company, 1965. p.503.
- 5 BHADSHIA, H. K. D. H. Alternatives to the Ferrite-Perlite Microstructures. Materials Science Forum, Vols. 284-286, p. 39-50,1998;
- 6 GLADMAN, T., MCLVOR, I.D., and PICKERING, F.B. Some Aspects of the Structure-Property Relationships. In: 2005 ASM International. Steels: Processing, Structure, and Performance, Vol. 05140G, 2005, p. 282.
- 7 WU, K.M and BHADSHIA, H.K.D.H. Extremely Fine Pearlite by Continuous Cooling Transformation. Scripta Material, Vol.67, 2012, p. 53-56.
- 8 HYZAK, J.M. and BERNSTEIN, I.M. The Role of Microstructure on the Strength and Toughness of Fully Pearlitic Steels. In: 2005 ASM International. Steels: Processing, Structure, and Performance, Vol. 05140G, 2005, p. 282.
- 9 LANGFORD, G. "A Study of the Deformation of Patented Steel Wire," Metallurgical Transactions, vol. 1, no. February, p. 465, 1970.
- 10 MODI, O. P., DESHMUKH, N., MONDAL, D. P., JHA, A. K., YEGNESWARAN, A. H., and KHAIRA, H. K. "Effect of interlamellar spacing on the mechanical properties of 0.65 % C steel," Materials Characterization, vol. 46, p. 347–352, 2001.
- 11 MEI, P. R. In: Aços e ligas especiais. Silva, André Luiz da Costa e Silva, Paulo Roberto Mei. São Paulo: ed. Blucher, 2006, p. 47.
- 12 MEI, P. R., PELLISSIER, G. E., RIDLEY, N., BROWN, D., AL-SALMAN, S. A. In: Aços e ligas especiais. Silva, André Luiz da Costa e Silva, Paulo Roberto Mei. São Paulo: ed. Blucher, 2006, p. 232-233.
- 13 RYU J-H and LEE, J-D. Effect of ROT Cooling Pattern on the Microstructure of the Hot-rolled High Carbon Steel Strip.
- 14 HUMPHREYS, F. J., and MATHERLY, M. Recrystallization and Related Anneling Phenomena. 2004, p. 437–444.
- 15 KORDA, A. A., MUTOH, Y., MIYASHITA, Y., and SADASUE, T. "Effects of pearlite morphology and specimen thickness on fatigue crack growth resistance in ferritic–pearlitic steels," Materials Science and Engineering: A, vol. 428, no. 1–2, p. 262–269, Jul. 2006.
- 16 KARLSSON, B., and LINDÉN, G. "Plastic Deformation of Euctetoid Steel with Different Cementite Morphologies," Materials Science and Engineering, vol. 17, p. 153–164, 1975.
- 17 SILVA, F. A. "Efeito do resfriamento controlado após laminação a quente nas propriedades mecânicas e na microestrutura de um fio-máquina de aço alto carbono com cromo". Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. UFMG – MG. P. 42-42. Maio/2007.