

MELHORIA DO FORMATO DE BOBINAS DE AÇO LAMINADO A QUENTE DESTINADAS À LAMINAÇÃO A FRIO PARA PRODUÇÃO DE AÇOS *DUAL PHASE**

Saulo Morais de Andrade¹
Márcio Hermanno Hermisdorff²
Robson Oliveira de Magalhães³

Resumo

O formato das bobinas de aço laminado a quente (BQ) pode ser afetado por uma ovalização em seu diâmetro que dificulta ou impede o processamento em linhas posteriores. A principal causa desse fenômeno é a transformação da austenita para ferrita durante o resfriamento da BQ. Em termos de composição química, uma das alternativas para produção de aços *Dual Phase* (DP) é a utilização de um teor mais elevado de manganês, elemento que expande o intervalo de temperatura onde a austenita é estável. Tal condição faz com que a tira de aço laminada a quente seja bobinada, dependendo da temperatura, no campo austenítico ou na região intercrítica, ficando sujeita às transformações de fase durante o seu resfriamento. Este trabalho objetivou melhorar o formato das BQ destinadas à laminação a frio para produção de aços DP. Foram realizadas alterações na temperatura e tensão de bobinamento, e no posicionamento do mandril após o término do bobinamento. Essas ações permitiram uma melhoria no formato das bobinas, com redução das ocorrências de ovalização.

Palavras-chave: Laminação a Quente; Aços *Dual Phase*; Ovalização.

IMPROVEMENT OF THE FORMAT OF HOT ROLLED STEEL COILS DESTINED TO COLD ROLLING TO PRODUCE DUAL PHASE STEELS

Abstract

The format of the hot rolled coils can be affected by ovalization of its diameter that difficult or prevent the processing in later lines. The main cause of this phenomenon is the transformation of austenite during the cooling of the hot rolled coil. In terms of chemical composition, one of the alternatives to produce Dual Phase (DP) steels is the use of highest content of manganese, element that expands the temperature range where the austenite is stable. This condition makes that the hot rolled strip steel to be coiled, depending on the temperature, in the austenitic field or intercritical region and be subject to phase transformations during its cooling. The aim of this work was to improve the format of the hot rolled coil destined to cold rolling to produce DP steels. Changes were made in the temperature and coiling tension and in the position of the mandrel after the coiling. These actions allowed an improvement in the format of the coils, with the reduction of occurrences of coil slump.

Keywords: Hot Rolling; Dual Phase Steels; Coil Slump.

¹ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Produção, Gerência Técnica de Laminações, Usiminas, Ipatinga, Minas Gerais, Brasil.

² Técnico em Administração, Técnico de Gestão, Gerência Técnica de Laminações, Usiminas, Ipatinga, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Mecânico, Supervisor de Produção, Gerência de Laminação de Tiras a Quente, Usiminas, Ipatinga, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A produção de tiras de aço em forma de bobinas trouxe muitos benefícios para estocagem, manuseio e transporte destes produtos. Mesmo assim, a operação de bobinamento não ocorre sem desafios. Com o passar do tempo foram realizadas alterações que permitiram uma melhoria na qualidade da bobina, como, o seu manuseio com o eixo longitudinal na direção horizontal, ao invés da vertical, reduzindo os danos nas bordas devido ao contato com o solo. Entretanto, devido à redução da área de apoio da bobina, pode ocorrer ovalização em seu diâmetro, afetando o seu formato [1]. Normalmente é observada uma pequena deformação assimétrica durante o resfriamento das bobinas laminadas a quente (BQ) com o eixo na direção horizontal e, em alguns casos, essa deformação pode se tornar acentuada [2], conforme ilustrado na Figura 1. Elevados níveis de ovalização são indesejados por afetar a operação de desbobinamento em processos subsequentes, pois gera uma distribuição inadequada de esforços mecânicos sobre o mandril. Além desse fato, um nível elevado de ovalização pode dificultar a extração das bobinas durante a produção, gerando paradas de linha e perda da bobina. Na Usiminas, a intensidade da ovalização é definida como a diferença entre o maior e o menor eixo interno da BQ, sendo que, diferenças superiores a 50 mm são consideradas críticas, pois limitam ou impedem o processo em linhas posteriores.



Figura 1. Aspecto de uma BQ apresentando elevado nível de ovalização [2].

A ovalização tem sua origem associada a causas metalúrgicas ou mecânico-geométricas. Dentre as causas metalúrgicas, pode-se citar a transformação de fase da austenita para ferrita durante ou após o bobinamento [1-4]. A ferrita gerada em temperaturas próximas a A_{r3} é mais macia do que a austenita que lhe deu origem. Aliado a isso, a recalescência gerada pela transformação de fase contribui para reduzir ainda mais a dureza da ferrita formada, aumentando a tendência da bobina ceder sob seu próprio peso [3-5]. Portanto é importante que a transformação de fase ocorra antes do bobinamento ou que a menor fração de austenita possível esteja presente durante o bobinamento.

Os aços DP são caracterizados por conter uma microestrutura que consiste em uma dispersão de segunda fase dura, normalmente martensita, em uma matriz ferrítica (macia). Teor de manganês da ordem de 2%, associados às condições de processamento termomecânico, pode ser utilizado para a obtenção dessa

microestrutura e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas do produto [6]. Por ser um elemento estabilizador da austenita, o manganês reduz a temperatura eutetóide e expande o intervalo de temperatura onde a austenita é estável. Tal condição faz com que a tira laminada a quente seja bobinada, dependendo da temperatura, no campo austenítico ou na região intercrítica, ficando sujeito às transformações de fase durante o resfriamento da bobina.

Santos *et al.*[4] simularam o resfriamento da tira após a laminação até o bobinamento através de ensaios dilatométricos para três tipos de aço, sendo um deles, denominado Aço B, similar ao utilizado neste estudo. De uma maneira geral, observou-se que a redução da temperatura de bobinamento adiantou e acelerou a transformação da austenita. No caso do Aço B (0,7% de C e 2,0% de Mn), para a temperatura de bobinamento de 650°C, 30% da transformação ocorreu após o bobinamento, sendo necessário quase 10 minutos para que a transformação da austenita terminasse. Para as temperaturas de 550°C e 500°C a fração transformada antes do bobinamento foi de 95% e 100%, respectivamente (Figura 2). Portanto, para a temperatura de bobinamento superior a 600°C a ocorrência de ovalização pode ter uma influência significativa da transformação de fase deste aço.

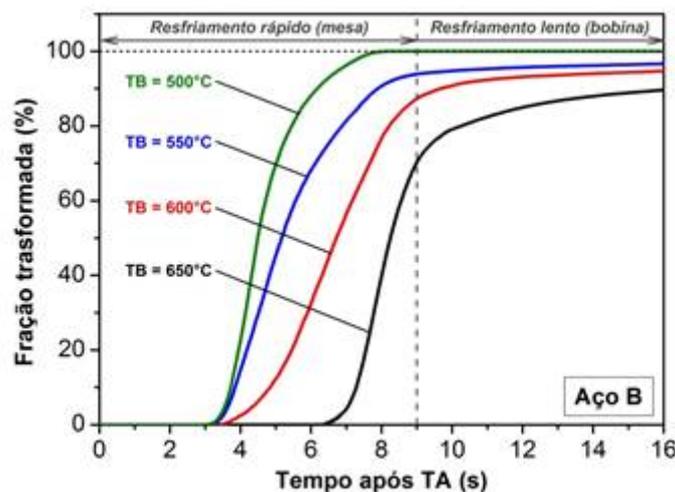


Figura 2. Fração de austenita transformada antes e após o bobinamento para um aço com 0,7% de C e 2,0% de Mn [4].

Em relação às causas mecânico-geométricas pode-se citar a tensão de bobinamento. Baixas tensões propiciam um menor contato e, portanto, menor atrito entre as espiras, permitindo que o deslizamento entre elas ocorra e que a bobina ceda sob seu próprio peso [7,8]. A tensão aplicada durante o bobinamento deve ser suficiente para prevenir o movimento entre as espiras. Lima *Jret al.*[5] mostraram uma redução na ocorrência de ovalização em BQ de aços com C entre 0,27% e 0,34% e Mn entre 1,20% e 1,55% através do aumento da tensão de bobinamento de 14 MPa para 26 MPa. Outros fatores mecânico-geométricos que afetam a ocorrência de ovalização são a espessura da tira e o peso da bobina. Espessuras mais finas são mais críticas devido a menor resistência à deformação propiciada pela sua menor seção transversal [1]. Em relação ao peso da bobina, a movimentação entre as espiras é facilitada quanto maior ele for [8].

Neste sentido, o trabalho teve como objetivo reduzir as ocorrências de ovalização das BQ destinadas à produção de aços DP na laminação a frio, otimizando a

temperatura e tensão de bobinamento, e o posicionamento final do mandril da bobinadeira.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Para realização do estudo foram utilizadas BQ de aço carbono-manganes destinadas à produção de aços DP na laminação a frio. O material foi produzido em escala industrial na planta de Ipatinga da Usiminas com a composição química aproximada de 0,07% de C e 2,00% de Mn, similar a um dos aços avaliados no estudo de Santos *et al* [4]. Devido a maior criticidade da ovalização em materiais de menor espessura, o trabalho focou em BQ com espessura menor que 3,50 mm.

Com base nos trabalhos disponíveis [2-5] na literatura sobre a transformação de fase do aço em questão e sobre a ovalização de uma forma geral, foram realizados testes com redução da temperatura e aumento da tensão de bobinamento. A temperatura foi alterada de 630°C para 550°C, escolhida por ser suficiente para transformar quase toda austenita antes do bobinamento e por não alterar de forma significativa a microestrutura da BQ [4]. A tensão foi aumentada de 12 MPa para 17 MPa e posteriormente foi realizado um novo incremento para 25 MPa, valor similar ao utilizado por Lima Jr *et al*. [5].

Além das variáveis citadas, realizou-se uma alteração na forma de posicionamento do mandril após o término do bobinamento. A ideia baseou-se em forçar uma ovalização em um sentido da bobina e compensá-la posteriormente. Para alcançar esse objetivo, após o término do bobinamento, o mandril foi contraído e a bobina ficou apoiada no mandril por 60 segundos. Este tempo foi escolhido por ser um tempo de espera possível de ser aplicado sem reduzir de forma considerável a produtividade da linha. O apoio da bobina no mandril direciona uma pequena ovalização com o maior diâmetro no sentido de apoio da bobina nos berços. Com a bobina apoiada nos berços a ovalização gerada pela transformação de fase aliada ao peso da BQ ocorre no sentido contrário.

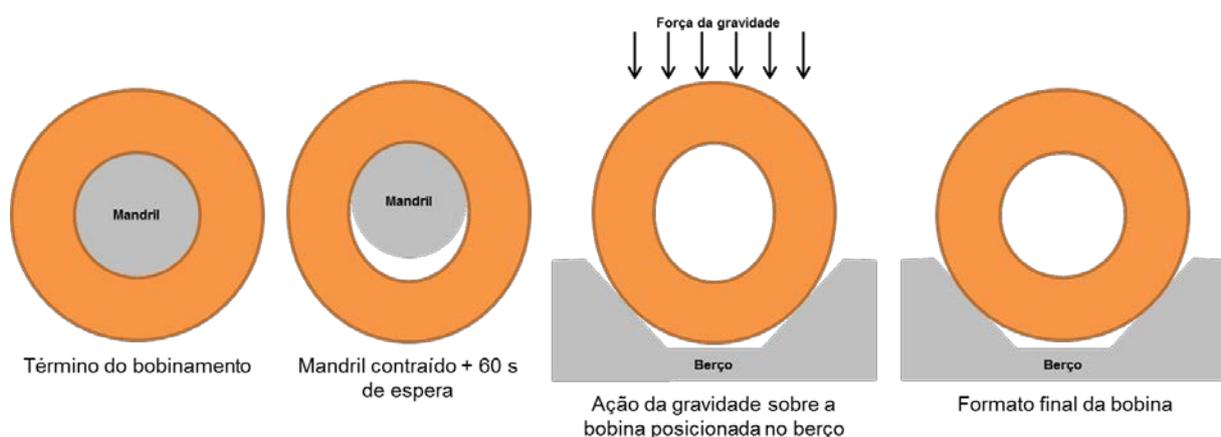


Figura 3. Desenho esquemático do procedimento do mandril contraído.

Os efeitos das alterações sobre o comportamento mecânico do mandril e no processo subsequente de laminação a frio foram avaliados.

A Tabela 1 mostra os valores utilizados para comparação de cada variável, sendo a condição 1 considerada como a condição de referência.

Tabela 1. Condições avaliadas visando a melhoria do formato da BQ

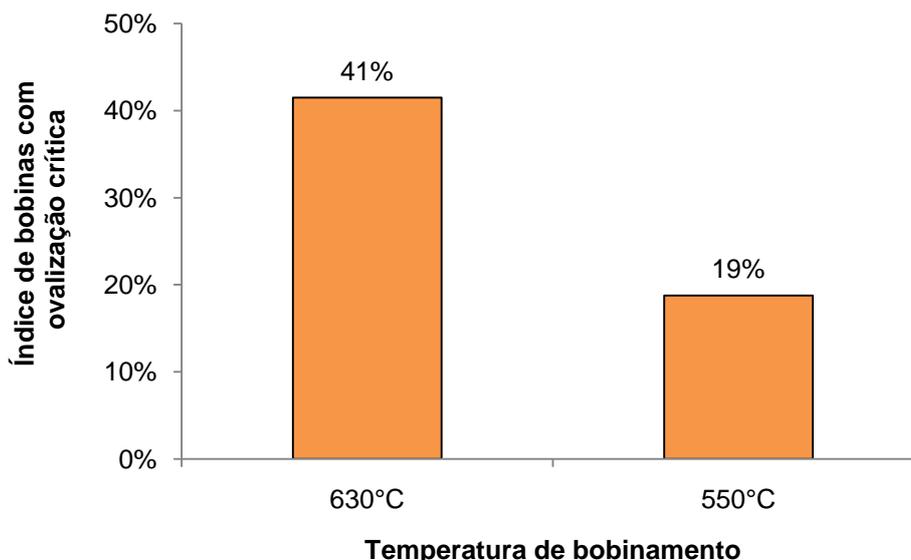
Condição	Temperatura de bobinamento (°C)	Tensão de bobinamento (MPa)	Posicionamento do mandril
1	630	12	Normal
2	550	12	Normal
3	630	17	Normal
4	630	17	Contraído
5	630	25	Contraído

Para cada condição, foi avaliado o índice de bobinas produzidas que apresentaram ovalização considerada crítica, ou seja, com diferença entre o maior e o menor eixo interno da BQ acima de 50 mm. O índice foi calculado dividindo o número de bobinas com ovalização crítica (OC) pelo número total de bobinas processadas. Também foram realizadas análises estatísticas através do teste qui-quadrado. O teste qui-quadrado é um teste de hipóteses que compara a distribuição real dos dados com uma distribuição esperada, avaliando se há dependência ou não entre as variáveis estudadas, sendo utilizado o valor p para indicar esta dependência. Considerando o nível de confiança de 95%, o valor p inferior a 0,05 indica que as variáveis estudadas são dependentes uma da outra.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Influência da temperatura de bobinamento

Corroborando com as conclusões do estudo de Santos *et al.* [4], a redução da temperatura de bobinamento propiciou uma queda considerável no índice de bobinas com OC (Figura 4). Banks *et al.*[3] também obtiveram uma redução das ocorrências de ovalização para aços com diferentes composições químicas utilizando temperaturas de bobinamento que propiciaram a transformação da austenita na mesa de resfriamento.

**Figura 4.** Índice de ocorrências de OC por temperatura de bobinamento.

O teste qui-quadrado obteve como resultado o valor p igual à zero, evidenciando uma associação estatisticamente significativa entre as variáveis, ou seja, a

quantidade de bobinas com OC é dependente da temperatura de bobinamento. Os dados obtidos na análise estão sumarizados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultado do teste qui-quadrado entre as condições 1 e 2

Condição	Distribuição	Quantidade de bobinas sem OC	Quantidade de bobinas com OC	valor p
1	Real	422	299	0,00
	Esperada	452,5	268,2	
2	Real	134	31	
	Esperada	103,5	61,5	

Apesar dos bons resultados em relação ao formato das BQcom temperatura de bobinamento de 550°C, foram observadas ocorrências de acentuado desvio de espessura na laminação a frio. Devido a isso, não foi possível manter uma temperatura de bobinamento mais baixa para o aço estudado.

2.2.2 Influência da tensão de bobinamento

Assim como obtido no estudo de Lima Jr *et al.* [5], o aumento da tensão de bobinamento propiciou uma redução na ocorrência de ovalização, conforme mostrado na Figura 5. Ainda que o resultado tenha sido inferior ao obtido com a alteração na temperatura de bobinamento, o aumento da tensão em 5 MPa promoveu uma queda considerável na OC. O teste qui-quadrado também mostrou que a ocorrência OC foi dependente da tensão de bobinamento (Tabela 3).

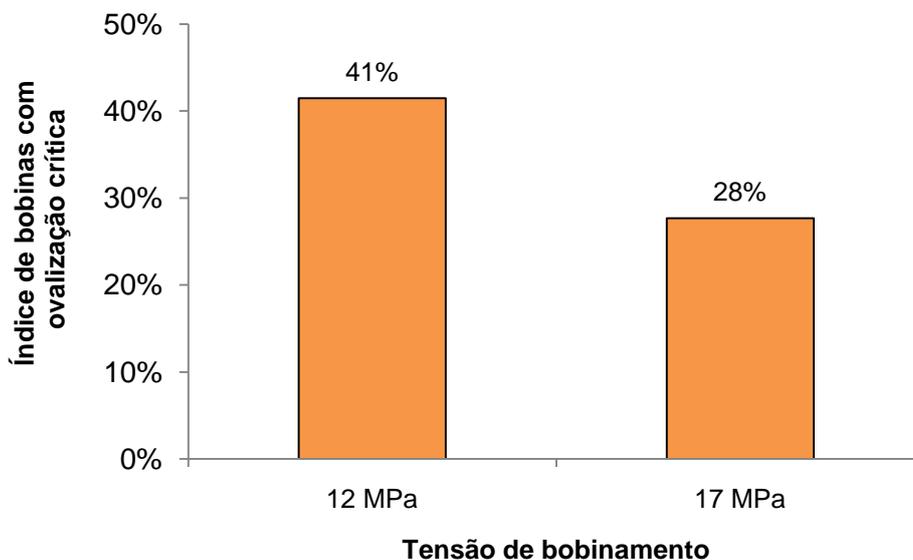


Figura 5. Índice de ocorrências de OC com variação da tensão de bobinamento.

Tabela 3. Resultado do teste qui-quadrado entre as condições 1 e 3

Condição	Distribuição	Quantidade de bobinas sem OC	Quantidade de bobinas com OC	valor p
1	Real	422	299	0,03
	Esperada	430,2	290,8	
3	Real	47	18	
	Esperada	38,9	26,2	

Não foram verificados problemas no comportamento mecânico do mandril ou durante o processo de laminação a frio que pudessem estar relacionados à alteração da tensão.

2.2.3 Influência do posicionamento final do mandril aliado ao aumento da tensão de bobinamento

Através da condição 4, que consiste na alteração do posicionamento final do mandril mantendo a tensão de bobinamento de 17 MPa, foi possível reduzir o índice de ocorrências OC de 28% para 20%. Mesmo com a implementação da prática do mandril contraído foi observado que as ocorrências de OC continuavam. Isso indicava que a deformação gerada pela transformação de fase e o apoio da bobina nos berços consumia toda aquela gerada no mandril. Tendo como base os valores aplicados no estudo de Lima Jr. *et al.* [5], foi realizado um novo acréscimo na tensão de bobinamento, objetivando aumentar o contato entre as espiras e dificultar o deslizamento entre elas. Foi aplicada na última condição testada a tensão de bobinamento de 25 MPa, mantendo a prática do mandril contraído e a temperatura de bobinamento de 630°C. A Figura 6 mostra o resultado alcançado comparando as condições testadas.

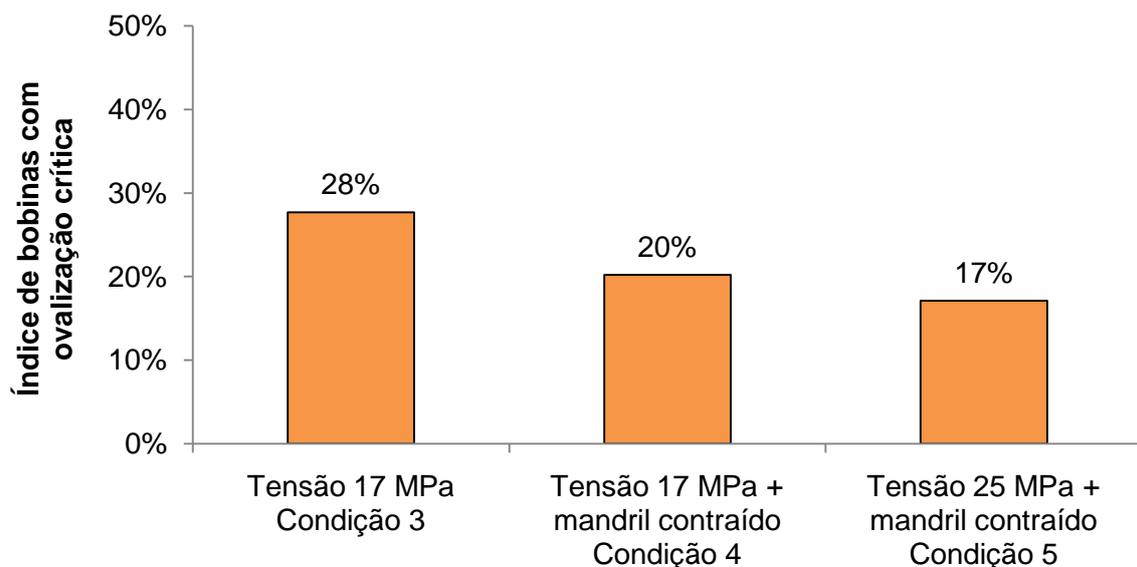


Figura 6. Comparação do índice de OC mudando o posicionamento final do mandril da bobinadeira associado ao aumento na tensão de bobinamento.

Conforme pode-se verificar, mais uma redução do OC foi obtida através da última condição testada, chegando a um nível de ocorrência de OC até menor que o obtido com a redução da temperatura de bobinamento.

A fim de comparar estatisticamente os resultados obtidos nas condições de 3 a 5 com a condição de referência, o teste qui-quadrado também foi aplicado. Conforme pode ser visualizado na Tabela 4, o valor p obtido mostra que o resultado foi dependente de cada alteração realizada.

Tabela 4. Resultado do teste qui-quadrado entre as condições 1, 3, 4 e 5

Condição	Distribuição	Quantidade de bobinas sem OC	Quantidade de bobinas com OC	valor p
1	Real	422	299	0,00
	Esperada	503,3	217,7	
3	Real	47	18	
	Esperada	45,4	19,6	
4	Real	267	74	
	Esperada	182,9	79,1	
5	Real	339	70	
	Esperada	285,5	123,5	

Não foram identificadas anormalidades na parte mecânica do mandril e no processo de laminação a frio relacionadas ao aumento da tensão de bobinamento. Em relação ao posicionamento final do mandril da bobinadeira, para os níveis de produção atuais de aços em que foi testada a prática, não foram verificadas situações que comprometessem o equipamento, sendo possível manter a prática para o aço estudado e avaliar sua aplicabilidade em outros tipos de aço.

3 CONCLUSÃO

Para o aço avaliado, a alteração da temperatura de bobinamento de 630°C para 550°C foi o método que isoladamente mais contribuiu para melhoria do formato das BQ. Porém, a variação de espessura ocorrida na laminação a frio não permitiu a implementação dessa prática.

O aumento de tensão de bobinamento, passando de 12 MPa para 25 MPa, aliada à prática do mandril contraído, permitiu uma redução das ocorrências de ovalização crítica até menor que a obtida com a redução da temperatura de bobinamento, sem trazer prejuízos aos processos subsequentes e à parte mecânica do mandril.

As análises estatísticas realizadas pelo teste qui-quadrado confirmaram que a ocorrência de ovalização crítica é dependente das variáveis estudadas.

A prática simulada na condição 5, que consiste na aplicação da tensão de bobinamento de 25 MPa e alteração no posicionamento do mandril, reduziu em mais da metade as ocorrências de ovalização crítica nos testes realizados, possibilitando uma melhoria no formato das bobinas laminadas a quente destinadas à produção de aços DP na laminação a frio e sua implementação como padrão.

Os resultados obtidos através do trabalho servirão de base para implementação em outros aços, visando melhorar o formato das bobinas laminadas a quente produzidas pela Usiminas.

REFERÊNCIAS

- 1 Gorni AA, Silva MRSS. Ovalização de bobinas a quente de aços com médio teor de carbono. 51° Seminário de Laminação. 2014; 51: 1-7.
- 2 Cho HH, Cho YG, Im YR, Lee JK, Kwak JH, Han HN. A finite element analysis for assymetric contraction after cooling of hot-rolled steel. Journal of Materials Processing Technology. 2010; 210: 907-913.
- 3 Banks K, Tuling A, Mintz B. Influence of chemistry and runout table parameters on hot coil collapse in C-Mn steels. Ironmaking and Steelmaking. 2011; 38(3): 204-210.
- 4 Santos PBD, Melo TMF, HermisdorffMH. Transformação de fase no resfriamento após a laminação a quente de aços propensos à ovalização de bobinas. 54° Seminário de Laminação e Conformação. 2017; 54: 557-567.
- 5 Lima Jr SO, Martins JBR, Prado AC, Volpato LFS, Silva CN. Redução da ovalização em bobinas a quente de um aço com $C_{eq} \geq 0,58\%$ produzido no LTQ da CST. 42° Seminário de Laminação. 2005.
- 6 Llewellyn DT, Hillis DJ. Dual Phase steels: review. Ironmaking and Steelmaking. 1996; 23(6): 471-478.
- 7 Wadsley AW, Edwards WJ. Coil winding stresses. Australian Institute of Metals Journal. 1977; 22(1): 17-27.
- 8 Yuen WYD, Cozijnsen M. Optimum tension profiles to prevent coil collapse. SEIASI Quarterly. 2000; 29(3): 50-59.