

SIMULAÇÃO DO MECANISMO DE FORMAÇÃO DO DEFEITO MECÂNICO IMPRESSO NA SUPERFÍCIE DA TIRA LAMINADA DE AÇOS INOXIDÁVEIS ¹

Wilian da Silva Labiapari ²
José Carlos Batista ³
Clênio da Silva Santana ⁴
Sandro Oliveira M. Lage ⁵
Nilson Gomes Fernandes ⁶

Resumo

Objetivou-se neste trabalho o entendimento do mecanismo de formação do defeito de marcas superficiais em baixo relevo, que ocorrem na superfície da tira laminada de aço inoxidável. São designados na ACESITA S/A como "colamento", e doravante assim chamados. Foram avaliadas as condições de bordas para dois aços, um ferrítico (AISI 430) e um austenítico (AISI 304), após etapa de recozimento e decapagem, objetivando evidenciar a sua mutação morfológica durante a laminação a frio. O estudo abrangeu a influência da tensão radial de bobinamento, atuando em uma marca em alto relevo da tira, simulando o contato com uma espira adjacente em uma bobina. O trabalho permitiu a associação do desprendimento de material das bordas, com o mecanismo de formação do defeito "colamento". Sendo originado inicialmente pelo contato de um cilindro de trabalho marcado com a superfície da tira, esta marca é transmitida entre as espiras da bobina. A simulação de contato permite verificar que uma pequena tensão de bobinamento pode ser suficiente para a impressão do defeito entre as espiras. Neste sentido, houve uma mudança do conceito sobre o defeito.

Palavras-chave: Bobinamento; Tensão; Contato; Defeito.

¹ Trabalho a ser apresentado no 42º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos – Santos – SP

² Engenheiro Mecânico, M. Sc, Pesquisador do Centro de Pesquisa – ACESITA S.A..

³ Engenheiro Mecânico, M. Sc, Assistente Técnico da Laminação a Frio de Inox – ACESITA S.A..

⁴ Engenheiro Mecânico, Assistente Técnico da Melhoria Contínua – ACESITA S.A..

⁵ Técnico Metalúrgico, Analista Téc. de Recozimento e Decapagem de Inox – ACESITA S.A..

⁶ Técnico Mecânico, Analista Téc. de Manutenção – ACESITA S.A..

1 INTRODUÇÃO

O defeito “colamento” são marcas superficiais que ocorrem em ambas as faces da tira laminada. Em função do aço inoxidável ser um produto de grande aplicação estética, esta ocorrência pode levar à um decréscimo do valor comercial do produto, necessitando reprocesso para minimizá-lo. A origem do defeito não se traduzia em um mecanismo claro, que pudesse direcionar uma ação com alvo preciso. Neste contexto, a base do trabalho foi a avaliação das condições de bordas de dois aços, um ferrítico (AISI 430) e um austenítico (AISI 304), materiais estes oriundos da laminação a quente, recolhidos após etapa de recozimento e decapagem.

As análises consistiram em avaliação de amostras da região da borda da bobina por microscopia ótica, no sentido transversal de laminação, na seção da espessura. Após a laminação a frio em laboratório, foi feita a comparação entre as amostras por inspeção visual.

Posteriormente, avaliou-se a evolução de defeitos causados por de cavidades nos cilindros de trabalho, associando-se aos ocorridos na área industrial, onde pequenas partículas promovem marcas nestes cilindros durante a laminação.

Também como parte integrante deste trabalho, avaliou-se as tensões possíveis entre uma marca em alto relevo e uma superfície plana, simulando em laboratório as condições de contato entre as espiras de uma bobina durante a laminação.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Avaliação da Mutação Morfológica das Bordas

As bordas dos aços ferrítico e austenítico são de aspectos bem diferenciados. O primeiro apresenta borda serrilhada (Figura 1) e o segundo mais homogênea (Figura 2). Trabalhou-se aqui com a espessura de 4,75 e 4,00mm respectivamente.

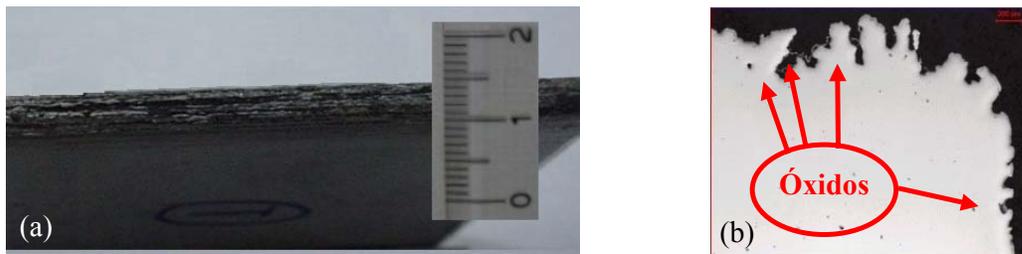


Figura 1. Vista de (a) topo a olho nu e (b) transversal via microscopia ótica da borda do aço ferrítico.



Figura 2. Vista de (a) topo a olho nu e (b) transversal via microscopia ótica da borda do aço austenítico.

Para comparação antes e após a laminação, as amostras foram retiradas segundo o esquema da Figura 3, nas dimensões de 40x100 mm, na borda e no centro. Estas foram submetidas à laminação a frio em laboratório, com redução total de 75%.

Após a laminação a frio, a forma se mostrou condizente às origens, sendo pior para as amostras do aço ferrítico, que partiram de bordas serrilhadas (Figura 1), do que para as do austenítico, onde as bordas eram mais suaves (Figura 2) cuja morfologia final pode ser observada na Figura 4.

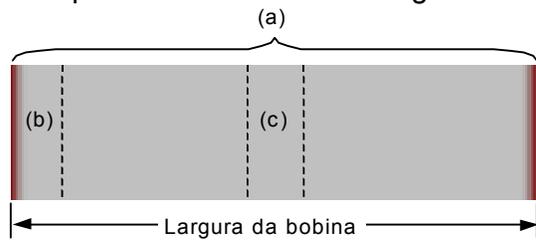


Figura 3. Esquema utilizado para retirada de amostra de bobina laminada a quente, recozida e decapada: (a) Amostra na largura da bobina; (b) Região da borda e (c) Região central

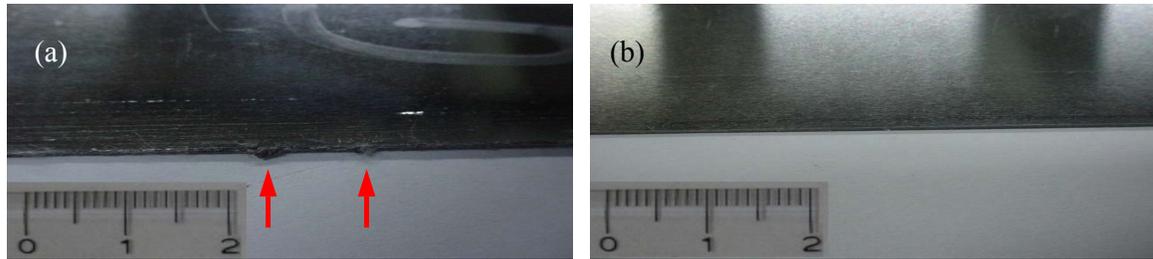


Figura 4. Amostra de borda laminada a frio: (a) aço ferrítico e (b) aço austenítico.

As bordas originalmente serrilhadas estão mais sujeitas ao desprendimento de material. Isso pode ser afirmado ao se comparar o estado antes (Figura 1 e 2) e após a laminação (Figura 4). Além das diferenças morfológicas iniciais, há a presença de óxidos próximos à superfície, nas amostras do aço ferrítico. Estes não sofrem deformação plástica, podendo desprender-se sob a forma pulverizada de partícula ou ficar aprisionado no material conformado. Este segundo comportamento tem papel fundamental no arrancamento de maiores partículas metálicas, como mostrado na Figura 4a, influenciando na forma adquirida após a laminação.

Ao compararmos com as amostras retiradas do centro da largura (conforme esquema da Figura 3), observa-se uma semelhança morfológica após a laminação (Figura 5). Neste caso, para os dois aços as condições iniciais das bordas eram similares e sem a presença de óxidos, por se tratar de amostra da região central da tira.

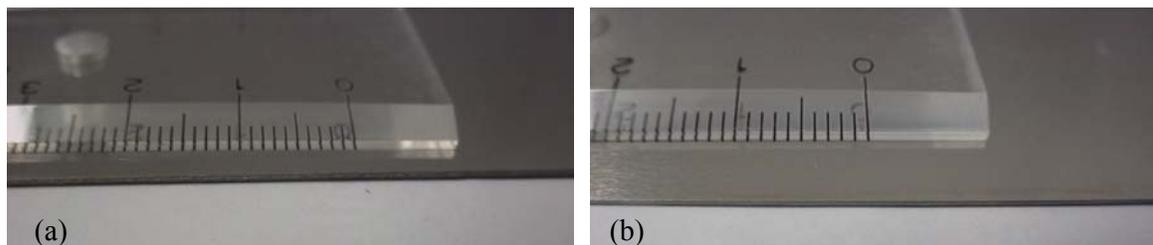


Figura 5. Vista lateral das amostras de centro laminadas a frio: (a) aço ferrítico e (b) aço austenítico.

Fica demonstrado aqui que o desprendimento de particulado de maior dimensão está relacionado à materiais com bordas serrilhadas, sendo aqui, o aço ferrítico. Isto aumenta possibilidade de formação de cavidades na superfície das amostras, bem como nos cilindros de trabalho. A Figura 6 mostra a ocorrência de cavidade durante a laminação deste material. A impressão na superfície da amostra leva à uma conseqüente impressão na superfície do cilindro, porém, com menor grau de severidade devido à maior dureza. Em outros trabalhos de laminação no Laboratório, este fenômeno já foi percebido, contudo, não na profundidade e número de ocorrências aqui encontradas. Isto porque não é usual a laminação de amostras de

borda de bobina em escala piloto. Controlando o peso dos corpos de prova, antes e após a laminação, percebe-se que a diferença de perda de massa entre as amostras é sempre maior na borda do que no centro¹, para os dois aços.

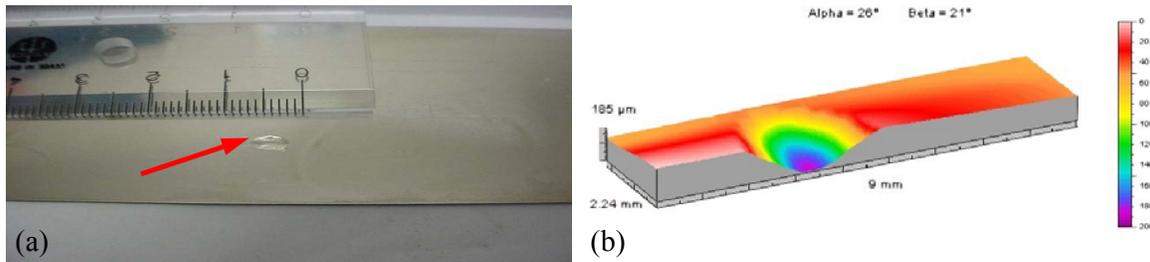


Figura 6. (a) Impressão em uma amostra promovida por desprendimento de partícula durante o processo de laminação a frio em laboratório. (b) Escala de profundidade medida por perfilometria.

Porém, esta diferença é de 101,5% para o aço ferrítico contra 31,4% para o austenítico, corroborando com a Figura 4.

Torna-se claro que o material desprendido pode marcar a amostra ou outra que venha a ser laminada em seguida. Sendo isto válido para uma cadeia de laminação simples, com poucos lugares para alojar as sujeiras como em laboratório, evidencia a validade para cadeiras mais complexas, como na área industrial.

3.2 Avaliação da Evolução da Saliência Impressa pela Cavidade do Cilindro

Entendido o processo de origem das marcas, nas chapas e nos cilindros, objetivou-se nesta etapa avaliar a intensidade das cavidades sobre a superfície da tira nos diferentes passes de laminação. Para isto, as amostras foram laminadas com um cilindro de laminação que havia uma cavidade (Figura 7).

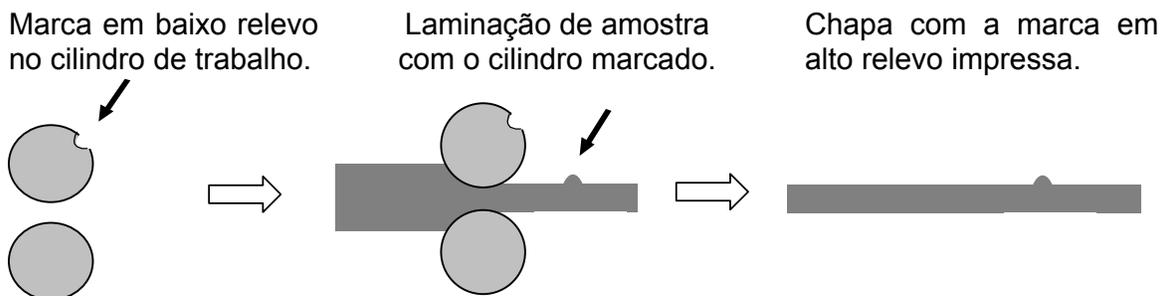


Figura 7. Esquema utilizado para obtenção de amostras com marcas em alto relevo.

À cada passe foi medido a espessura da amostra na região plana, a espessura na região da marca impressa e a dureza do material, acompanhando-se assim, a evolução da saliência e da curva de encruamento do material. A Figura 8 mostra a impressão da marca em um passe e sua remoção no passe seguinte. Pode-se observar pela Figura 8b que não há marca alguma após um passe de laminação.

¹ Borda e centro conforme esquema da Figura 3

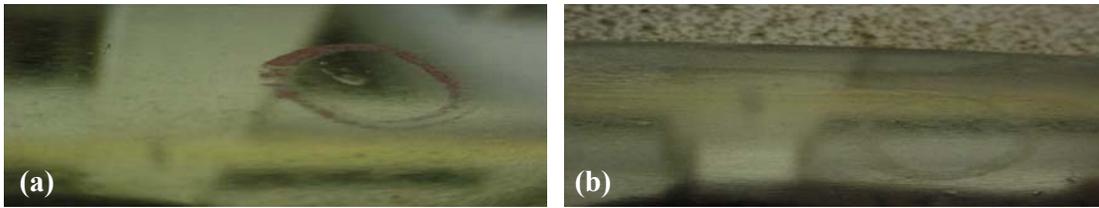


Figura 8. (a) Marca provocada pelo cilindro de laminação no 9º passe e (b) removida no passe seguinte, 10º.

A Figura 9 mostra a evolução da diferença de altura entre a região marcada e a região plana da chapa, além da dureza após cada passe. Observa-se um decréscimo na altura da marca impressa, de 38 para 8 μm . Isto pode ser atribuído ao encruamento do material, e à menor redução específica, em mm, a cada incremento de passe.

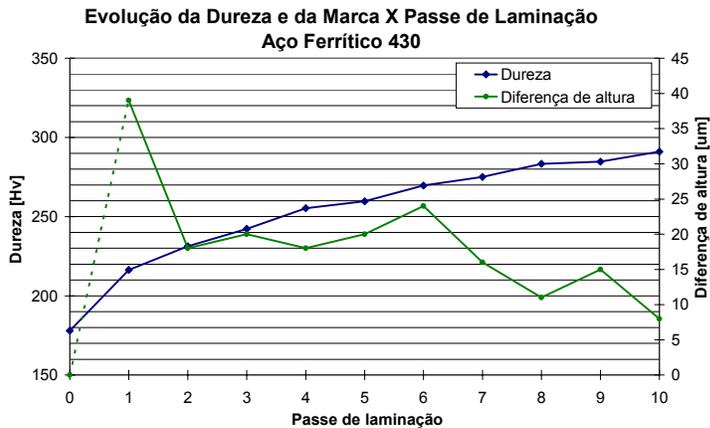


Figura 9. Evolução da diferença entre a altura da marca impressa pelo cilindro e da superfície plana da chapa, além da dureza, em cada passe.

Com a cavidade no cilindro, pode-se ver claramente a formação de uma impressão negativa no material. Conseqüentemente, marcas aparecem alinhadas e espaçadas do perímetro do cilindro de trabalho, ou seja, a cada revolução deste, uma nova é impressa. Como estas marcas são em alto relevo, fica fácil removê-las no passe seguinte, porém, elas podem causar danos superficiais durante o bobinamento, devido à tensão entre as espiras.

3.3 Avaliação da Origem e Evolução das Marcas em Baixo Relevo

A marca é impressa em alto relevo na superfície da tira (Figura 10a), durante o bobinamento é comprimido contra a superfície de outra espira (Figura 10b). Esta condição pode promover uma marca em baixo relevo na superfície da espira adjacente, por ser um ponto de concentração de tensões, bem como na superfície do próprio defeito (Figura 10c). Estando em baixo relevo, os defeitos não desaparecem imediatamente nos passes seguintes de laminação, ao contrário do mostrado na Figura 8 para a condição em alto relevo.

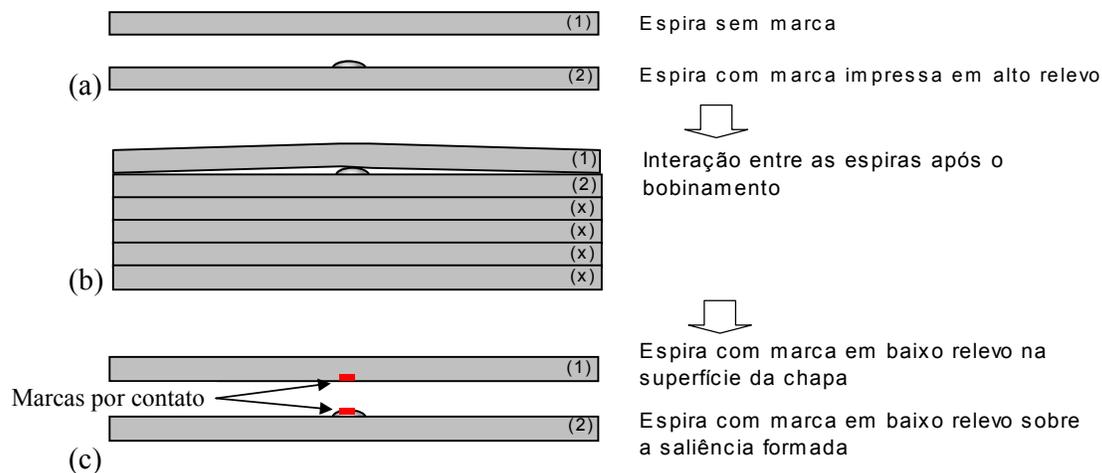


Figura 10. Mecanismo de formação das marcas em baixo relevo no bobinamento.

Isto é constatado na linha industrial, onde aparecem alinhados, com distâncias equivalentes ao perímetro do cilindro trabalho, acrescidas das deformações impostas pelos passes de laminação⁽¹⁾.

Na Figura 11 está a situação, onde em laboratório foi reproduzido o defeito. Primeiramente, uma marca foi impressa, em baixo relevo, no cilindro de trabalho. Posteriormente, foram laminadas amostras de aço ferrítico, AISI 430, de forma a imprimir a marca na superfície desta (Figura 7), que em seguida foi arranhada em seu cume (Figura 11a). Também foi arranhada a amostra em uma região plana (Figura 11d). Estes dois passos iniciais, simulam o ocorrido entre as espiras (Figura 10). Após dois passes de laminação (1,98 \Rightarrow 1,72 \Rightarrow 1,49mm, 25% de redução total), o arranhão não saiu em nenhuma das duas condições, como pode ser visto nas Figuras 11b e 11e, mas a marca que estava em alto relevo sim (Figura 11b).

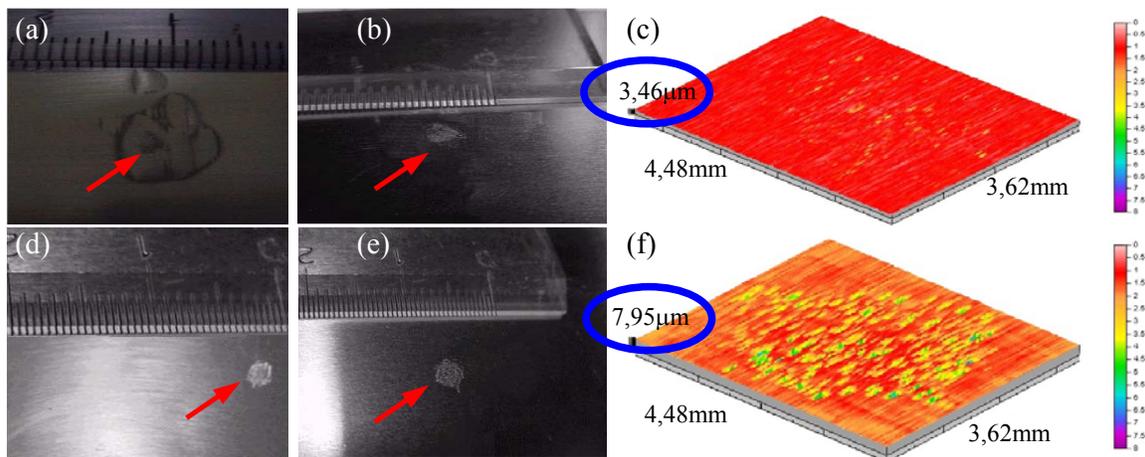


Figura 11. Amostra com uma marca impressa em alto relevo pelo cilindro de trabalho, arranhada em seu (a) cume e (d) em uma região plana da amostra. (b)(c) Arranhão que estava no cume da marca em alto relevo e (e)(f) na região plana da amostra, após a laminação com 25% de redução total, sendo (c) e (f) avaliada por perfilometria.

Assim sendo, deve-se evitar o contato entre as espiras quando há cavidades nos cilindros. As duas marcas, na superfície da saliência e na região plana, tinham inicialmente a mesma morfologia. Contudo, ao observarmos após a deformação pelos dois passes de laminação, é menos evidente a marca na superfície da saliência, como pode ser visto na Figura 11c e 11f. Provavelmente isto se deve à maior deformação que está sujeita esta região em alto relevo

3.4 Simulação das Tensões de Contato entre as Espiras

Para simulação do defeito, conforme o esquema da Figura 7, inicialmente foi produzida uma marca em baixo relevo no cilindro de trabalho. Posteriormente, amostras do aço ferrítico AISI 430 foram laminadas com uma redução total de 40%, em dois passes. Obteve-se assim, amostras com e sem a marca impressa de forma negativa em alto relevo (Figura 12), além de um certo grau de encruamento.

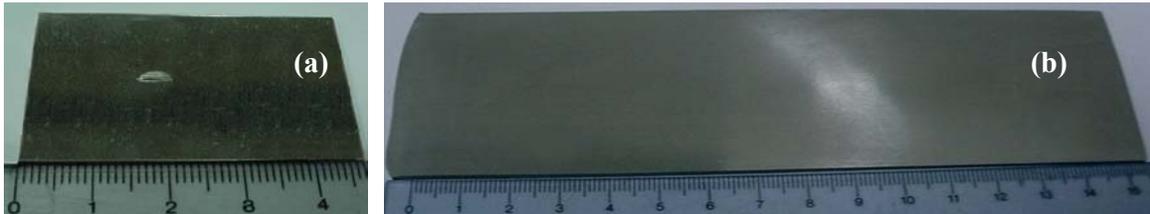


Figura 12. Amostras obtidas no laboratório (a) com marca em alto relevo e (b) sem.

Para simulação das tensões de bobinamento entre espiras (Figura 13), utilizou-se uma máquina de tração, cuja célula de carga permite avaliar também esforços de compressão. As amostras com as marcas em alto relevo (Figura 12a), nas dimensões de 47X30mm, foram comprimidas contra as amostras não marcadas (Figura 12b). Orientando-se por dados de literatura,⁽²⁾ utilizou-se nestes testes tensões entre 10 e 60 MPa, que em função da área das amostras, representaram cargas entre 14,1 e 84,6 kN, levando à impressões como mostrado na Figura 13.

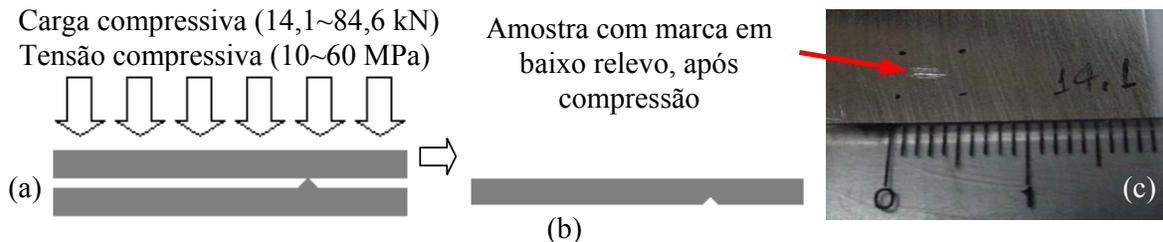


Figura 13. Esquema utilizado para (a) simulação das tensões de bobinamento, (b) produzindo marcas em baixo relevo. (c) Amostra com o efeito similar ao ocorrido entre as espiras de uma bobina.

Embora as tensões de compressão são baixas, estas se refletem de forma diferente quando há uma região em alto relevo entre as amostras. Isso se deve ao fato de que a força é transmitida pela área de contato, que nesse caso sendo pequena, torna a tensão de entre as amostras elevada. Para quantificar esses valores, levantou-se as cotas verticais da marca em alto relevo através de análise por perfilometria (Figura 15a). Também no mesmo equipamento, mas via software, cortou-se a marca para obtenção de áreas à diferentes níveis de altura, sendo mostrada nas Figuras 15b, 15c, 15d e 15e. Estas diferentes áreas foram utilizadas para os cálculo de tensão de contato, estando estes dados na Tabela 3.

Tabela 3. Cálculo das tensões de contato em função da área em alto

Marca em alto relevo			Carga [kN], tensão [MPa]						
Altura [μm]	Área		Carga aplicada	14,1	28,2	42,3	56,4	70,5	84,6
	[%]	[mm ²]	Tensão	10	20	30	40	50	60
45	0,6	8,1	Tensão (MPa) no contato entre as amostras para cada combinação carga/área, em função da altura da marca em alto relevo	1730	3460	5190	6920	8651	10381
40	3,3	45,8		308	615	923	1231	1538	1846
35	5,9	82,6		171	341	512	683	853	1024
30	8,2	115,8		122	244	365	487	609	731
25	10,3	145,2		97	194	291	388	485	583
20	12,4	174,8		81	161	242	323	403	484
15	22,6	318,7		44	88	133	177	221	265
10	83,1	1171,7		12	24	36	48	60	72

As tensões de contato são crescentes no sentido de maior carga e menor área, o que mostra neste segundo ponto a influência da morfologia da marca em alto relevo onde, se for muito reduzida, poderá concentrar excessivamente as tensões.

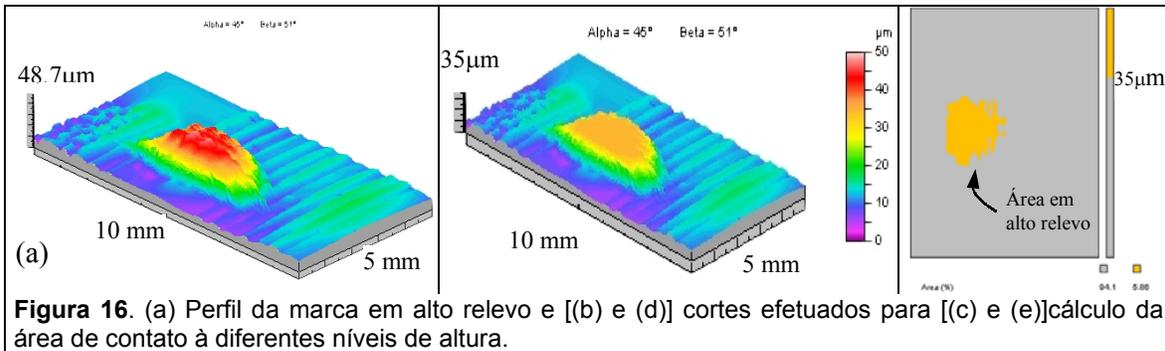


Figura 16. (a) Perfil da marca em alto relevo e [(b) e (d)] cortes efetuados para [(c) e (e)]cálculo da área de contato à diferentes níveis de altura.

Para entendimento da severidade das tensões de contato entre a superfície em alto relevo e a outra superfície plana do aço, foi necessário traçar a curva de fluxo para o material em estudo, estando os valores exibidos na Figura 17.

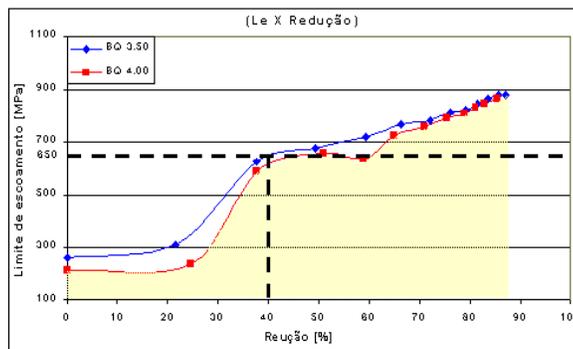


Figura 17. Curva de fluxo traçada para o aço ferrítico AISI 430

Como dissertado por DIETER,⁽³⁾ acima da tensão de escoamento, haverá deformação plástica. Em nosso caso, significa dizer que sempre que a tensão de contato exceder a tensão de escoamento do aço, com 40% de redução aqui, surgirão marcas superficiais. Desta forma, com uma área reduzida de contato ou com uma força elevada entre as espiras, há a condição física necessária para ocorrência deste defeito, cuja intensidade pode ser vista pela Figura 18.

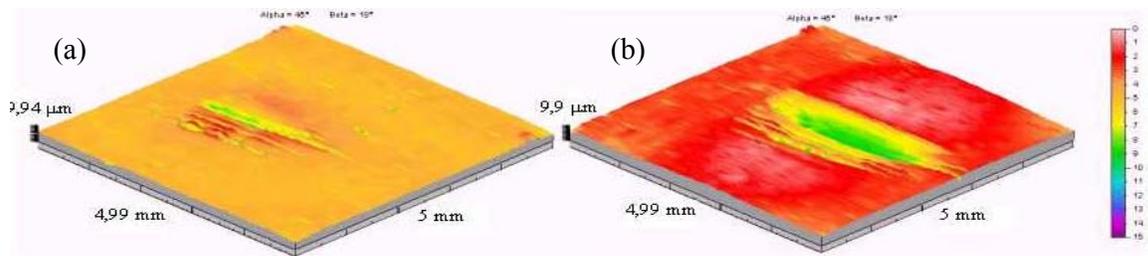


Figura 18. Defeito formado pela saliência em alto relevo da Figura 13a no contato entre as amostras, com tensões aplicadas de (a) 10 MPa e (b) 60 MPa.

Pelo gráfico da Figura 17 e a condição abordada de 40% de redução, sempre que a tensão de contato exceder 650 MPa, as marcas aparecerão, constituindo assim o defeito conhecido na ACESITA S.A. por “colamento”. As tensões calculadas que promoveriam estas marcas estão em destaque na Tabela 3, mostrando que mesmo com uma tensão baixa entre espiras (10 MPa), pode haver a formação do defeito, caso a área de contato seja pequena.

O que se percebe na área industrial é uma maior intensidade do defeito em material mais grosso. Isto se justifica pelo fato de que as cargas de tração são maiores, sendo elas as principais responsáveis pela tensão de compressão entre espiras. Associa-se à isto, uma maior incidência de marcas nos cilindros, além de uma menor redução percentual da espessura, ou seja, material menos encruado sendo mais susceptível ao defeito.

Existem três agravantes à este estudo, que em laboratório não foram considerados. O primeiro trata das cargas de tração no bobinamento. Pelos cálculos de tensão efetiva,⁽³⁾ os esforços de compressão entre as espiras, provocando o defeito, serão inversamente proporcionais aos esforços de tração no bobinamento, facilitando sua ocorrência. O segundo diz respeito à temperatura de laminação. Mesmo estas sendo consideradas baixas, na ordem de 80°C, contribuem para redução do limite de escoamento do aço, o que não ocorre em laboratório, onde os testes foram executados à temperatura ambiente. Por último, caso haja um deslizamento entre espiras, este tenderá à alongar o defeito, tornando-o mais visível. Esta situação não foi simulada em laboratório, pois, o movimento relativo entre as amostras, previamente comprimidas, demandaria uma elevada carga tangencial.

Contudo, vale ressaltar que mesmo as marcas ocorrendo, elas podem ser eliminadas ou minimizadas nos passes posteriores de redução da espessura. Assim, a percepção pelo mercado consumidor deste produto pode ser insignificante. Por outro lado, caso continuem visíveis, estas estarão alinhadas e serão múltiplas das deformações dos passes de laminação.⁽¹⁾

4 CONCLUSÕES

Em relação à qualidade de borda bobina à laminar, e pela morfologia adquirida após a laminação a frio, conclui-se que a condição inicial de bordas serrilhadas é determinante para a o desprendimento de materiais. Nas condições deste trabalho, as bordas do aço ferrítico são as mais propícias.

Em relação ao material desprendido, estando na cadeira de laminação, pode ser impresso em baixo relevo, uma marca na superfície da tira e outra em menor intensidade na superfície do cilindro.

Em relação às marcas em baixo relevo no cilindro, é visto que são impressas marcas em alto relevo na superfície da tira laminada. Em condições de bobinamento sob tensão de tração, estas marcas imprimem uma depressão na superfície da espira que estão imediatamente em contato, e também em seu cume. O ressalto em alto relevo,

é removido imediatamente no passe seguinte. Já as marcas em baixo relevo, são mais difíceis de remoção, permanecendo por vários passes.

Em relação ao bobinamento, tem-se que mesmo com baixas tensões de compressão entre espiras, estas podem exceder o limite de escoamento plástico do aço, caso haja algum ponto concentrador desta tensão. As marcas em alto relevo na superfície da tira podem fazer este papel. As tensões aqui avaliadas, chegam à 10 GPa, conforme a combinação entre a área de contato e a carga aplicada, sendo este valor mais de 15 vezes superior ao necessário para ocorrência de marcas superficiais no material estudado.

Pode-se afirmar também que, independente do tipo de aço, sempre que houver uma marca no cilindro em baixo relevo, esta poderá criar condições físicas para a ocorrência do defeito “*colamento*” entre as espiras durante a laminação.

Em relação à deformação sofrida, vê-se que a medida que o material fica mais encruado, mais difícil é de ser marcado, conforme as Figuras 09 e 17. Assim, materiais com altas deformações totais são menos susceptíveis ao defeito, caso dos materiais mais finos.

Atendendo ao objetivo principal deste estudo, de uma forma resumida, partículas se desprendem da borda e marca, em baixo relevo, o cilindro de trabalho. Em seguida, o cilindro marca em alto relevo a tira durante a laminação. Este alto relevo deforma pontualmente a superfície da tira com a qual entra em contato durante o bobinamento. Por ser em baixo relevo, esta marca é de difícil remoção, sendo visto por vários passes de laminação, após ter se formado.

REFERÊNCIAS

- 1 LABIAPARI, Wilian da S., BATISTA, José C., RT10-332/2003 - ACESITA S.A.- Caracterização de defeitos superficiais em cilindro de laminação e em BF do aço P430E associados ao defeito “*colamento*” – Out/2003.
- 2 YANAGI, Shusuke, HATTORI, Shigeo, MAEDA, Yasushi, IBATA, Haruhiro, SUGIMOTO, Yuichiro, SAWADA Mamoru - Coil Deformation and Flatness Change under Strip Coiling Flatness - JOURNAL OF THE JAPAN SOCIETY FOR TECHNOLOGY OF PLASTICITY – Mar/1998.
- 3 DIETER, George E., Metalurgia Mecânica, Editora Guanabara Koogan S.A., Rio de Janeiro, 1976, cap. 3.
- 4 LABIAPARI, Wilian da S., BATISTA, José C., RT10-381/2004 - ACESITA S.A.- Influência da qualidade de borda na formação do defeito “*colamento*” na laminação a frio – Jul/2004.
- 5 LABIAPARI, Wilian da S., BATISTA, José C., RT10-397/2004 - ACESITA S.A.- Análise das condições de contato necessárias à ocorrência do defeito colamento durante o bobinamento na laminação a frio. – Out/2004.

SIMULATION OF ORIGIN MECHANISM OF THE DEFECT IDENTIFIED AS IMPRESSED MARKS ON STAINLESS STEEL SHEET SURFACE¹

*Wilian da Silva Labiapari*²
*José Carlos Batista*³
*Clênio da Silva Santana*⁴
*Sandro Oliveira M. Lage*⁵
*Nilson Gomes Fernandes*⁶

Abstract

The understanding of the superficial defect mechanism, like marks, that occur on the surface of the plated stainless steel was the target in this work. The conditions of edges for two steels, a ferritic (AISI 430) and austenitic (AISI 304), after stage of annealing and pickling, had been evaluated to evidence its morphologic changing during cold rolling. The study involved the influence of the radial coiling tension, acting in a mark in high relief of the strap, simulating the adjacent contact with one strap in a coil. The work allowed the association of material unfastening of the edges, with the mechanism of the defect. Being initially originated for the contact of a work cylinder marked at the surface of the strap, this mark is transmitted to the other in the coil. The contact simulation allows to verify that a small coiling tension can be enough for the impression of the defect between straps.

Key-words: Coiling; Tension; Contact; Defect.

¹ *42nd Rolling Seminar - Processes, Rolled and Coated Products – Santos – SP*

² *Mechanical Engineer, M. Sc, Researcher of Research Center – ACESITA S.A..*

³ *Mechanical Engineer, M. Sc, Process Engineer of Cold Rolling – ACESITA S.A..*

⁴ *Mechanical Engineer, Continuous Development Engineer – ACESITA S.A..*

⁵ *Metallurgist Technician, Process Technician of Annealing & Pickling Line – ACESITA S.A..*

⁶ *Mechanical Technician, Maintenance Technician – ACESITA S.A..*