

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO A FRIO PARA RELAMINAÇÃO DE BOBINAS FULL-HARD COMO ALTERNATIVA DE ABASTECIMENTO DA CSN-LLC (EUA)¹

Eduardo Sidney Dias²
Fernando Celso Kaminski³
Luiz Cláudio da Silva⁴
Luiz Roberto Amorim Pereira⁵
Nilton José Linhares⁶

Resumo

A CSN-LLC (Limited Liability Company) tem passado por grandes dificuldades para abastecer de matéria-prima a sua planta em Terre Haute/EUA. Essas dificuldades decorrem da planta não possuir um laminador a quente e também da política tarifária praticada pelo governo americano que sobretaxa em muito a bobina a quente (BQ) importada por esse país. Esse trabalho teve como objetivo criar melhores alternativas para abastecimento dessa unidade nos EUA a partir da CSN-UPV (Usina Presidente Vargas) em Volta Redonda. Nesse cenário, para certas dimensões e especificações, a CSN-LLC usava a relaminação de bobinas laminadas a frio e recozidas (BF) adquiridas da CSN-UPV em substituição à BQ, primeiramente, porque não havia disponibilidade de BQ e, depois, porque a BF é mais atrativa do ponto de vista econômico-tarifário (já mencionado). O trabalho aqui proposto apresenta uma nova alternativa de fornecimento a partir de bobinas apenas laminadas a frio – “full-hard” (BFH) para relaminação na CSN-LLC. O trabalho foi desenvolvido a partir da realização de encomendas experimentais e produção piloto para verificação de viabilidade técnica e ajuste dos parâmetros de processo nas diversas unidades produtivas. Uma encomenda inicial de 1000 t de BFH foi produzida pela CSN-LLC obtendo grandes resultados tanto para essa planta quanto para a UPV. Comparativamente ao processamento da BF, o uso da BFH mostrou as seguintes vantagens: i) Aumento de Produtividade no Laminador Reversível a Frio da CSN-LLC devido ao menor número de passes requeridos para relaminação; ii) Redução nos custos de produção da CSN-LLC e CSN-UPV por usar BFH no lugar de BF; iii) Melhoria na Mistura de Produtos do Laminador de Tiras a Frio No. 3 (LTF#3) da CSN-UPV com aumento da espessura a frio já que a redução final será feita na CSN-LLC e iv) Maior disponibilidade de produtos BF pela UPV.

Palavras-chave: Relaminação; Laminação a frio; Laminador reversível

DEVELOPMENT OF COLD ROLLING PROCESS TO PROVIDE RE-ROLLING OF FULL-HARD COILS AS A ALTERNATIVE SUPPLY TO CSN-LLC (USA)

Abstract

The CSN plant in USA (forward called only by LLC – Limited Liability Company) has worked with great difficulties to purchase raw material to its plant in Terre Haute. These difficulties are because they don't have a hot strip mill and also because the hard USA government taxes policy that over tax imported hot rolled coils. The subject to this work is develop better alternatives to supply this plant in USA from CSN plant in Volta Redonda-Brazil (forward called only by UPV – Usina Presidente Vargas). In this context, the LLC used to work with fully processed coil (cold rolled and annealed) for certain dimensions and specifications of products. Such coils were bought from UPV instead of hot rolled coils mainly because fully processed coils pay less tax than the hot rolled ones. Another reason was that UPV didn't have the requested amount of hot rolled coils available to sell to LLC. This work present a new alternative of supply LLC with full hard coils to be re-rolling. It was developed using trial orders and experimental rolling in order to check technical availability and also to provide the required process adjusts. A initial 1,000 metric ton order weight of full hard coils was produced by UPV to LLC and the results reached was great for both LLC and UPV. Comparing to fully processed coil, the use of full hard coils had the following advantages: i) Due the use of less reduction passes productivity increased in LLC's Reverse Mill; ii) Due the use of full hard instead of fully processed coils the production cost decreased in both LLC and UPV; iii) Mix improvement to Tandem Cold Mill in UPV due to thickness increase once the last reduction is applied by LLC and iv) provide best availability of fully processed coils from UPV to others customers.

Key words: Re-rolling; Cold rolling; Reverse mill

¹ Contribuição técnica ao 43^o. Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos da ABM, outubro de 2006, Curitiba-PR

² Engenheiro Eletrônico, Coordenador de Projetos Especiais da Gerência Geral de Galvanizados e Laminados a Frio da Usina Presidente Vargas, CSN – Volta Redonda/RJ

³ Engenheiro Eletricista, Engenheiro de Processo da CEU na CSN-PR – Curitiba/PR

⁴ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro Especialista de Operação da Gerência de Redução a Frio da Usina Presidente Vargas, CSN – Volta Redonda/RJ

⁵ Engenheiro Metalurgista, Coordenador de Projetos Especiais da GGPS da Usina Presidente Vargas, CSN – Volta Redonda/RJ

⁶ Engenheiro Metalurgista, Engenheiro de Processo Especialista da Gerência Geral de Galvanizados e Laminados a Frio da Usina Presidente Vargas, CSN – Volta Redonda/RJ

INTRODUÇÃO

Os laminadores reversíveis apresentam uma boa alternativa para o processo de laminação a frio de aços planos, principalmente, devido ao investimento inicial mais baixo quando comparado aos laminadores de 4 ou 5 cadeiras. Porém, a produtividade desses laminadores reversíveis passa a ser um fator que exige bastante atenção e estudo, porque a espessura final é conseguida com uma seqüência de passes, logo, para uma mesma espessura final, quanto maior for a espessura a quente, maior será o número de passes aplicados e, conseqüentemente, menor será a produtividade. Uma decisão óbvia é a de utilizar menores espessuras a quente, e então, reduzir o número de passes e aumentar a produtividade, contudo, essa prática levará a redução na produtividade da laminação a quente e decapagem. O resultado final dessa equação é que as espessuras a quente praticadas para laminadores reversíveis são menores do que as utilizadas em outros tipos laminadores a frio, portanto, numa fábrica que opere com diferentes tipos de laminadores, a produção das bobinas a quente será “personalizada” para o fluxo que ela seguirá (laminador reversível ou não).

As usinas que utilizam laminadores reversíveis quase sempre não possuem laminação a quente, ou mesmo, linha de decapagem. Isso faz com que elas tenham a necessidade de comprar e transportar bobinas a quente (BQ) ou bobinas a quente decapadas (BQD). Se o fornecedor dessa matéria-prima está muito distante, além dos maiores custos com a logística, teremos um grande “lead-time” entre a entrada da encomenda e a produção da bobina a quente (com uma espessura compatível) para o laminador reversível, tornando praticamente inviável o fornecimento do aço dessa maneira. Esse era o caso da planta CSN situada em Terre Haute / EUA (doravante designada por LLC ou LLC/EUA– Limited Liability Company) a qual passou a adquirir bobinas a frio recozidas (BF) da planta CSN situada em Volta Redonda / Brasil (doravante designada de UPV ou UPV/VR– Usina Presidente Vargas) em substituição às bobinas a quente (BQ). Essa solução atendia às necessidades de obter espessuras diferenciadas para o laminador reversível sem, contudo, provocar perda na produtividade das linhas de laminação a quente e decapagem. Por outro lado, o custo desse processo ainda é bem elevado devido à quantidade de equipamentos envolvidos nesse fluxo (laminador de tiras a frio; recozimento contínuo ou em caixa; laminador de encruamento; etc.). Outro fator a ser considerado é que as linhas de acabamento deixavam de atender mercados mais nobres por conta desse novo fornecimento. Apesar do uso da BF parecer mais desfavorável comparativamente com o uso de BQ, isso não é verdade por 3 motivos:

- i) No mercado americano não há disponibilidade de BQs na quantidade necessária à LLC e os preços para aquisição, por conseqüência, são bem maiores do que os normalmente praticados no comércio internacional;
- ii) Devido à política tarifária praticada pelos EUA, o preço da BF comprada da UPV é mais baixo do que o valor da BQ adquirida pela LLC;
- iii) A UPV tinha disponibilidade nas suas linhas de recozimento para fornecer a BF.

A saída para reduzir ainda mais esse custo de produção e tornar a LLC mais competitiva e lucrativa é o alvo do trabalho aqui apresentado, o qual propõe a produção de um material intermediário, denominado de “Semi-Hard”. A idéia desse projeto é um material que já tenha sofrido uma redução a frio (da ordem de 40% - dada no LTF#3), porém, não seja recozido e que possa ser utilizado diretamente no laminador reversível da CSN/LLC como matéria prima para ser relaminado.

MATERIAL E MÉTODOS

Esse trabalho foi desenvolvido a partir da realização de encomendas experimentais e produção piloto para verificação de viabilidade técnica e ajuste dos parâmetros de processo nas diversas unidades produtivas. O planejamento executado nesse projeto teve as seguintes fases a destacar:

1. Definição das espessuras (Quente e Frio) para a bobina “Semi-Hard”;
2. Estudo e planejamento da laminação a frio e relaminação;
3. Laminação a frio no Laminador de Tiras a Frio No. 3 (LTF#3) da UPV/VR;
4. Embalagem e transporte;
5. Relaminação piloto no Laminador Reversível (LRF) da planta CSN situada em Araucária/Paraná (doravante designada de CSN/PR);
6. Elaboração de relatório final;
7. Realização de “Trial Order” para a LLC/EUA.

O material obtido dessa laminação piloto foi avaliado em suas etapas intermediárias e na etapa final de galvanização (realizada na CSN/PR e CSN/LLC) segundo critérios de qualidade conforme listados adiante:

1. Qualidade superficial;
2. Qualidade da embalagem;
3. Tolerância dimensional (largura e espessura);
4. Aplainamento;
5. Propriedades mecânicas.

RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos com base na “trial order” de 1000 t do material “Semi-Hard” da UPV para relaminação na LLC.

A utilização de material “Semi-Hard” propiciou ao Laminador Reversível da LLC (2 cadeiras) a eliminação de um passe de redução porque esse trabalho preliminar já havia sido aplicado ao material na UPV. A produtividade subiu em média 63,6% na laminação dos materiais “Semi-Hard” e aproximadamente 8% no volume total produzido por esse laminador.

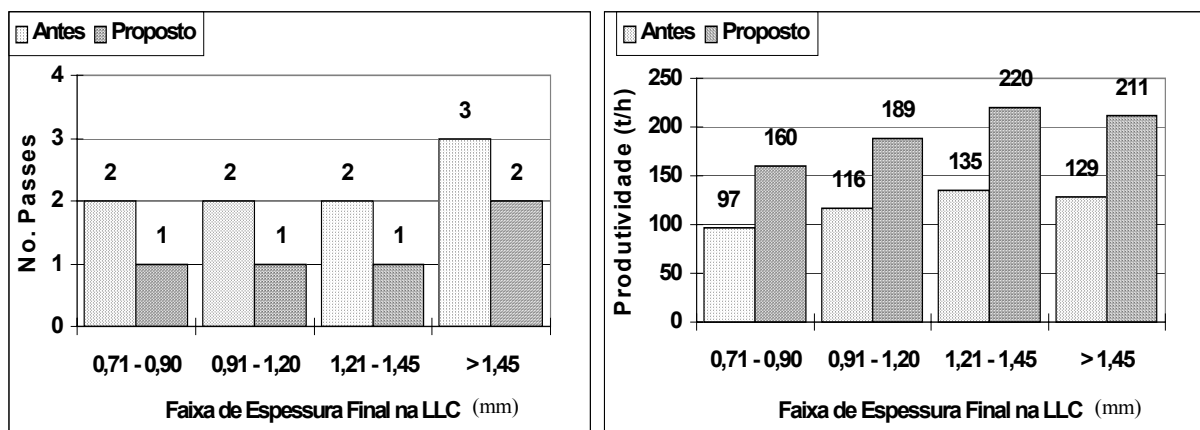


Figura 1 – Número de Passes e Produtividade antes de utilizar material “Semi-Hard” e com a nova proposta de fornecimento

A melhoria na mistura dos produtos “Semi-Hard” propicia ganhos de produtividade nos principais equipamentos da UPV envolvidos nesse fluxo de produção, conforme é mostrado a seguir:

Tabela I –Produtividades para os equipamentos no fluxo de produção do material “Semi-Hard”

Produtividade Média	Fornecimento UPV Anterior	Fornecimento UPV “Semi-Hard”	Ganho
Laminador a Quente	810 t/h	818 t/h	1,0%
Decapagem	314 t/h	341 t/h	8,5%
Laminador a Frio	310 t/h	338 t/h	9,4%
Laminador Reversível LLC	116 t/h	126 t/h	8,3%

A mudança no fornecimento de material recozido (BF) para “Semi-Hard” (BFH) disponibilizou mais tempo para produção na Linha de Recozimento Contínuo de Chapas e Fornos de Recozimento em Caixa da UPV. A contabilidade aqui é simples, a UPV continua fornecendo o mesmo volume de material para a LLC, porém, os processos de recozimento ganham maior disponibilidade para entrada de novas encomendas. Essa mudança exige uma maior produção de “Full-Hard” para atender a necessidade do “Semi-Hard”, a qual é obtida através do ganho de produtividade no fluxo de produção e da ocupação plena de todas as linhas.

DISCUSSÃO

1. Definição das espessuras (Quente e Frio) para a bobina “Semi-Hard”

A definição das espessuras a quente e a frio para atendimento desse novo produto “Semi-Hard” foi baseada, primeiramente, na experiência operacional adquirida ao longo de vários anos em tais laminações e depois num estudo bibliográfico ^{[1], [2]} que desse o suporte técnico/científico para uma escolha correta. Essa forma foi extremamente eficaz porque desde a primeira laminação piloto, os resultados obtidos já foram bastante satisfatórios e apenas pequenas correções foram realizadas para otimizar as produtividades e o processo produtivo como um todo.

Tabela II – Relação Final de Espessuras para o material “Semi-Hard”

LLC/EUA	Fornecimento UPV Anterior					Fornecimento UPV “Semi-Hard”				
	Pro- duto	Red. LLC (%)	Esp. Frio (mm)	Red. LTF (%)	Esp. Quente (mm)	Pro- duto	Red. LLC (%)	Esp. Frio (mm)	Red. LTF (%)	Esp. Quente (mm)
0,30–0,35	BF	78,6	1,524	60,9	3,90					
0,36–0,40	BF	80,1	1,905	51,1	3,90					
0,41–0,51	BF	78,2	2,108	50,4	4,25					
0,52–0,89	BF	72,2	2,540	46,5	4,75	BFH	53,6	1,52	49,3	3,00
0,90–1,45	BQ	67,0	---	---	3,56	BFH	45,1	2,14	45,1	3,90
1,46–1,83	BQ	64,0	---	---	4,57	BFH	40,0	2,74	42,3	4,75

2. Estudo e planejamento da laminação a frio e relaminação

Com uma definição preliminar das espessuras a quente e frio, onde a idéia preliminar foi a de aplicar uma primeira redução de 40% no LTF#3 que era igual ao primeiro passe aplicado no laminador reversível da LLC, realizamos um planejamento para a laminação piloto de um lote com 8 bobinas nas seguintes dimensões:

Tabela III – Características das bobinas “Semi-Hard” para laminação piloto

Esp. Quente (mm)	Esp. Frio (mm)	Largura (mm)	Grau do Aço	Redução Total a Frio aplicada na UPV	Quantidade de Bobinas
2,70	1,60	1100	Baixo Carbono	40,7%	2
3,00	1,80	1100	Baixo Carbono	40,0%	2
3,50	2,10	1100	Baixo Carbono	40,0%	2
4,50	2,65	1100	Baixo Carbono	41,1%	2

Como o acompanhamento desse material na LLC seria bem mais difícil devido à distância entre essa planta nos EUA e a UPV no Brasil, decidimos simular o trabalho a ser feito na LLC usando o Laminador Reversível da CSN/PR. Definimos as estratégias de laminação (plano de redução, velocidade, tensões, passes, etc.) para ambos os laminadores a frio da UPV (5 cadeiras) e o laminador reversível da CSN/PR (1 cadeira). Nessa fase contamos com os recursos de simulação disponíveis nos modelos matemáticos existentes nesses laminadores.

Após a relaminação desse lote experimental na CSN/PR, chegamos a 16 bobinas (divididas as 8 bobinas ao meio) das quais algumas foram enviadas para a LLC avaliar a qualidade da embalagem para o produto e, também, para galvanizá-las e verificar se o produto atenderia às suas necessidades. As bobinas restantes foram galvanizadas na própria CSN/PR.

As bobinas enviadas para LLC tinham também o objetivo de avaliar as condições da logística empregada nessa transação.

Dentro do nosso planejamento contemplamos também ações para avaliação e garantia da qualidade necessária ao produto. Sendo assim, amostras foram coletadas nos vários fluxos produtivos e gráficos de acompanhamento das principais variáveis de laminação foram analisados para verificar os resultados alcançados nos itens de qualidade de maior importância para o produto.

3. Laminação a frio no Laminador de Tiras a Frio No. 3 (LTF#3) da UPV/VR

Para a laminação no LTF#3 temos os seguintes resultados a destacar:

Tabela IV – Material “Semi-Hard” Laminado na UPV (2,70 x 1,60 x 1100 mm)

Cadeira	Redução	Vel (mpm)	Carga (t)	Tensão (Kg/mm²)	Desliz. Avante	ResDef (Kg/mm²)
1	13,0%	542	700	13,43	6,0%	18,7
2	14,0%	637	556	14,76	3,6%	34,8
3	10,2%	715	590	15,53	2,4%	56,4
4	7,7%	780	500	14,82	1,8%	55,4
5	3,3%	809	540	3,54	0,6%	67,3

Tabela V – Material “Semi-Hard” Laminado na UPV (3,00 x 1,80 x 1100 mm)

Cadeira	Redução	Vel (mpm)	Carga (t)	Tensão (Kg/mm2)	Desliz. Avante	ResDef (Kg/mm2)
1	11,6%	505	652	10,97	3,2%	33,5
2	14,5%	595	600	13,35	3,5%	37,7
3	9,9%	664	604	12,64	2,2%	55,1
4	8,8%	733	580	13,71	2,1%	57,9
5	2,6%	754	496	3,61	0,5%	66,2

Tabela VI – Material “Semi-Hard” Laminado na UPV (3,50 x 2,10 x 1100 mm)

Cadeira	Redução	Vel (mpm)	Carga (t)	Tensão (Kg/mm2)	Desliz. Avante	ResDef (Kg/mm2)
1	12,2%	543	712	12,40	3,4%	34,6
2	14,7%	638	600	12,52	3,4%	32,9
3	9,9%	711	664	13,24	2,3%	57,5
4	8,2%	777	556	12,03	1,8%	52,6
5	2,9%	801	586	2,20	0,5%	71,2

Tabela VII – Material “Semi-Hard” Laminado na UPV (4,50 x 2,65 x 1100 mm)

Cadeira	Redução	Vel (mpm)	Carga (t)	Tensão (Kg/mm2)	Desliz. Avante	ResDef (Kg/mm2)
1	14,0%	437	854	12,61	3,9%	38,0
2	11,7%	500	564	12,45	2,8%	31,8
3	8,4%	550	666	12,23	1,9%	57,6
4	10,6%	621	718	12,47	2,4%	57,2
5	4,6%	655	658	2,21	0,8%	63,6

Tabela VIII – Ensaio de tração no material “Semi-Hard” Laminado na UPV

Dimensão Esp. Quente X Esp. Frio (mm)	Tensão de Escoamento [Mpa]	Limite de Resistência [Mpa]	Embutimento [mm]	Dureza [HRb]
2,70 x 1,60	628	670	9,4	89
3,00 x 1,80	638	655	9,9	89
3,50 x 2,10	630	653	10	89
4,50 x 2,65	615	646	11	88

4. Embalagem e transporte

O produto “Semi-Hard” foi desenvolvido para atender à LLC que está nos EUA, logo, a logística deveria ser testada e verificada porque a intenção original da CSN é enviar bobinas com peso de até 25t utilizando transporte ferroviário até o porto, onde elas seguiriam viagem de navio. A embalagem deve ser forte o bastante para suportar os manuseios dessa logística e o rigor do clima americano, porém, o seu custo não deve ser elevado. A embalagem realizada foi desenvolvida com base em nosso melhor padrão para BF do mercado interno porém com “reforços” para atender às necessidades destacadas anteriormente. O custo dessa embalagem é bem menor do que a utilizada para exportação e a sua eficácia foi testada e aprovada pela LLC.

5. Relaminação piloto no Laminador Reversível (LRF) da CSN/PR

Para a laminação no Laminador Reversível da CSN/PR, temos os seguintes resultados a destacar:

Tabela IX – Relaminação na CSN/PR do material “Semi-Hard”

Esp. Entrada (mm)	Pass	Red (%)	H1 (mm)	H2 (mm)	H Exit (mm)	Carga [MN/m]	Bend. [kN]	Vel [m/min]	Tensão rev [N/mm ²]	Tensão for [N/mm ²]
1,60 x 0,70	1	32.7	1.60	1.08	1.08	9.90	901.9	268.4	39.80	103.70
	2	24.0	0.82	1.08	0.82	7.40	397.4	573.6	105.10	135.40
	3	14.4	0.82	0.70	0.70	5.90	114.7	674.5	135.80	65.40
1,60 x 0,80	1	28.1	1.60	1.15	1.15	8.80	837.6	89.7	38.10	93.90
	2	20.5	0.91	1.15	0.91	7.00	419.4	251.9	91.80	123.80
	3	12.4	0.91	0.80	0.80	6.10	227.1	133.6	123.10	77.50
1,80 x 0,70	1	28.1	1.80	1.29	1.29	9.70	860.4	225.2	39.90	85.30
	2	31.7	0.88	1.29	0.88	8.90	601.3	482.9	86.60	126.50
	3	20.8	0.88	0.70	0.70	7.30	283.2	486.1	126.20	63.80
1,80 x 0,80	1	32.1	1.80	1.22	1.22	10.20	828.0	394.2	39.80	91.70
	2	23.6	0.93	1.22	0.93	7.20	220.4	749.7	92.70	118.30
	3	14.3	0.93	0.80	0.80	5.70	15.5	813.7	118.50	66.30
2,10 x 1,00	1	23.7	2.10	1.60	1.60	9.50	810.1	355.5	39.80	70.40
	2	21.4	1.26	1.60	1.26	7.50	259.5	527.2	70.90	88.30
	3	20.6	1.26	1.00	1.00	7.20	178.0	566.4	88.10	65.30
2,10 x 1,20	1	27.3	2.10	1.53	1.53	10.10	874.4	335.6	47.90	75.70
	2	21.3	1.20	1.53	1.20	7.70	318.2	613.4	75.20	62.10
2,65 x 1,40	1	20.9	2.65	2.10	2.10	10.20	952.6	259.8	29.60	52.90
	2	18.3	1.71	2.10	1.71	8.20	535.3	411.7	53.40	65.20
	3	18.3	1.71	1.40	1.40	7.50	162.8	427.6	65.00	81.20
2,65 x 1,65	1	21.1	2.65	2.09	2.09	10.00	863.9	260.8	38.30	53.10
	2	21.1	1.65	2.09	1.65	8.70	561.5	371.9	48.60	66.80

6. Elaboração de relatório final

Um relatório final foi elaborado onde foram incluídos em detalhe todos os já resultados apresentados com as conclusões e recomendações da equipe envolvida no projeto. A principal conclusão foi a de que era perfeitamente viável a utilização desse novo produto “Semi-Hard” e de que seria necessária a produção de um lote experimental maior para que a LLC pudesse dar início a relaminação seguindo as recomendações e informações passadas nesse relatório técnico.

7. Realização de “Trial Order” para a LLC/EUA

A partir dos resultados obtidos com a laminação piloto, a LLC colocou na UPV uma “trial Order” de 1000t do produto Semi-Hard. As informações de processamento dessas bobinas é apresentado a seguir de forma resumida:

Tabela X – Volumes Produzidos na UPV

Volume (Kg)		Largura (mm)		Total
Esp. Quente (mm)	Esp. Frio (mm)	1218	1522	
2,65	1,59	271.710	241.470	513.180
4,57	2,74	271.090	243.810	514.900
Total		542.800	485.280	1.028.080

Tabela XI – Resumo da Relaminação na LLC/EUA

Esp. Quente (mm)	Esp. Ent. (mm)	Esp. Final (mm)	Red. LLC (%)	Red. Total (%)	Largura (mm)	Peso (Kg)	Passes	Produt. (t/h)
2,65	1,59	0,75	52,8	71,7	1200	40.944	1	140,5
2,65	1,59	0,85	46,5	67,9	1200	38.383	1	151,0
2,65	1,59	0,90	43,4	66,0	1200	120.864	1	163,6
2,65	1,59	0,90	43,4	66,0	1500	161.655	1	191,5
2,65	1,59	0,95	40,3	64,2	1200	40.320	1	191,7
2,65	1,59	0,95	40,3	64,2	1500	67.916	1	188,9
4,57	2,74	1,15	58,0	74,8	1200	118.882	2	130,0
4,57	2,74	1,15	58,0	74,8	1500	67.526	2	130,0
4,57	2,74	1,45	47,1	68,3	1200	96.370	2	150,0
4,57	2,74	1,45	47,1	68,3	1500	94.864	2	150,0
4,57	2,74	1,50	45,3	67,2	1200	39.032	1	314,5
4,57	2,74	1,70	38,0	62,8	1500	61.815	1	309,9

Com relação aos itens de qualidade, todos os requisitos foram alcançados e a classificação das bobinas após relaminação foi a de primeira qualidade.

CONCLUSÃO

Todos os objetivos inicialmente traçados para esse projeto foram alcançados porque os resultados nos mostraram os seguintes ganhos:

- Redução nos custos de produção da LLC/EUA com o fornecimento de uma matéria-prima mais barata e de mesma qualidade;
- Redução nos custos de produção da UPV/VR com o uso de menos equipamentos envolvidos no fluxo produtivo;
- Aumento na oferta de produtos laminados a frio da UPV/VR;
- Aumento da produtividade nos principais equipamentos da UPV e no Laminador Reversível da LLC.

Com o desenvolvimento de mais esse produto, a LLC tem maior flexibilidade para realizar as suas operações e se torna mais competitiva em seu mercado de atuação.

BIBLIOGRAFIA

- 1 D. Callister Willian, Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução (1991), LTC Editora
- 2 E. Dieter Geoger, Metalurgia Mecânica (1981), Mc Graw Hill