

# DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS E SEUS VALORES NA FABRICAÇÃO DE TUBOS ALETADOS DE COBRE POR COLAMINAÇÃO\*

*Esteveesson Ferreira Miqueletti<sup>1</sup>  
Ronaldo Antonio Neves Marques Barbosa<sup>2</sup>  
José Maria Ramón Caccioppoli<sup>3</sup>*

## Resumo

Neste trabalho, tiras de cobre foram laminadas para se obter tubos aletados. As variáveis importantes ao sucesso do projeto foram: a) a temperatura de tratamento térmico e b) a largura da tira. Tiras largas resultaram em pouca união, levando a escolha de tiras menos largas. Temperaturas altas também resultaram em baixa união. A melhor condição foi tiras de 100 mm de largura e 500°C de tratamento térmico.

**Palavras-chave:** Tubo aletado; Trocador de calor; União em fase sólida; Colaminação.

## DEFINITION OF VARIABLES OPERATING AND THEIR VALUES IN MANUFACTURING TUBES FINNED COPPER BY ROLL-BONDING

### Abstract

In this work, copper strips were rolled to get finned tubes. The important process variables were: a) heat treatment temperature and b) the width of the strips. Wide strips result in poor joining, therefore narrow strips were chosen. High temperature also resulted in poor joining. The best choice was strips 100 mm width and heat treatment at 500°C.

**Keywords:** Finned tube; Heat exchanger; Cold pressure welding; Roll-bonding.

<sup>1</sup> Engenharia Mecânica, Mestrando, Téc. em Mecânica, Lab. Conformação Mecânica/Departamento; Engenharia Metalúrgica e de Materiais e Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenharia Mecânica, PhD, Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Físico, Dr., Professor Aposentado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A união em fase sólida é uma soldagem permanente de metais iguais ou distintos, realizada em temperaturas tais que não ocorram fusão dos metais. Uma das explicações mais aceita é que, para se ter a união em fase sólida é necessário haver ligação metálica entre as superfícies a serem unidas [1].

Para isso, é essencial uma deformação crítica, que é a deformação plástica mínima necessária para promover a união permanente de um par metálico. A união em fase sólida é resultante das condições superficiais de ambas as chapas, do nível de deformações plásticas dos metais e das tensões de compressão. À medida que o par metálico adentra na região do arco de contato durante a laminação há um aumento da pressão aplicada e a deformação plástica produz uma expansão da superfície, surgindo áreas de metal “virgem” de modo a promover a ligação metálica entre as superfícies do par metálico [2].

A preparação superficial pelo escovamento mecânico é muito difícil de reproduzir e caracterizar os parâmetros do processo de escovamento, como: tempo, pressão da escova, o sentido de escovamento, velocidade de rotação, etc. A heterogeneidade na forma de escovamento gera uma heterogeneidade no próprio estado das superfícies. Esses parâmetros variam também com o tipo de óxido formado, como no caso de óxidos frágeis, como  $Al_2O_3$  ou mais dúcteis, como o  $CuO$  ou  $Cu_2O$ . Igualmente de difícil reprodução e o que ocorre com o nível de modificação da microestrutura dos metais após o escovamento.

Tratamentos térmicos realizados anteriormente à colaminação ajudam ou não no processo de união [1]. Metais mais encruados apresentam uniões mais resistentes que metais recozidos, devido a facilidade da quebra de óxidos. Por outro lado, metais recozidos necessitam de menor pressão aplicada para uma mesma deformação. Por outro lado, tratamentos térmicos realizados após a união podem levar em alguns casos, a um aumento da resistência entre as superfícies; e em outros casos a uma diminuição, ou nesses casos é possível que ocorram rupturas na soldagem das uniões obtidas por colaminação.

Helman e Martinez [3] também demonstraram em seus trabalhos de controle de umidade sobre a resistência das uniões e deformações críticas, que uma superfície limpa é rapidamente coberta por uma camada de material adsorvido e de vapor d'água absorvido na superfície. Desta forma, a variação destas camadas de impurezas irá fazer parte dos parâmetros da resistência da união.

Uma boa preparação inicial da superfície das tiras de cobre é necessária para que haja sucesso na união em fase sólida. O tratamento térmico inicial de recozimento antes da colaminação diminui a tensão de união, aumentando assim a deformação para união das tiras, mas é necessário o devido cuidado para que não haja formação demasiada de camadas de óxidos, pois as mesmas causam um grande encruamento causado pelo escovamento e dificultando a união entre o par metálico. Deste modo, colaminou-se várias amostras com tratamento térmico a diferentes temperaturas e com diferentes larguras. E verificando seus efeitos na colaminação, tanto na retlineidade como na formação do tubo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As colaminações foram realizadas com cobre recozido, fosforoso, UNS C12000, com 99,90 % mínimo em peso de cobre e adições de fósforo entre 0,004 a 0,012% em

peso. O cobre foi fornecido como chapas de 600 mm de comprimento, 1200 mm de largura e 1,07 mm de espessura.

O objetivo do trabalho é obter tubos aletados que possam ser utilizados principalmente em coletores solares ou como trocadores de calor para outros equipamentos, com dimensões de 950 mm de comprimento e 0,5 mm de espessura, para isso as chapas foram cortadas em formas de tiras em diferentes larguras. Isto altera a pressão de laminação. Essa alteração de pressão foi obtida variando as larguras das tiras cujos valores escolhidos foram os de 80, 100, 120 e 150 mm.

Para se obter um comprimento final de 950 mm a partir da colaminação de duas chapas de 1,07 mm de espessura cada e terminando com uma tira colaminada de 0,5 mm de espessura, isto é, uma redução de 4:1, era necessário iniciar a colaminação com pelo menos 950 mm de comprimento final dividido por quatro, ou seja, no mínimo 237,5 mm. Durante a colaminação observou-se, porém, que devido ao coroamento dos cilindros, as tiras colaminadas aumentavam de comprimento de tal modo que as partes centrais das tiras ficavam, nas caudas e nas cabeças, maiores que nas laterais. Por conta disso, havia a necessidade de se cortarem excessos nas caudas e nas cabeças. Como resultado, após tentativas e erros, os comprimentos iniciais das tiras foram estabelecidos como 260, 280, 300 e 320 mm respectivamente para as larguras de 80, 100, 120 e 150 mm. Os cortes foram realizados em guilhotina de chapa marca Newton, modelo GMN, com capacidade máxima de corte de  $8,2 \times 10^{-6}$  MPa.

As tiras preparadas como descrito acima foram recozidas em duas etapas. Na primeira etapa os recozimentos foram realizados antes da colaminação com o objetivo de recristalizar e, portanto amaciar os metais a serem deformados a frio. Para se determinar qual seria a melhor temperatura de recozimento do ponto de vista não só da recristalização como também da formação de óxidos nas tiras – observa-se que os recozimentos foram realizados em forno mufla ao ar – foram escolhidas as temperaturas de 500, 600 e 800°C por um tempo de 20 minutos.

Na segunda etapa, novo recozimento foi realizado após as colaminações. Isto porque o metal se encontrava muito encruado após a deformação a frio sendo impossível a formação do tubo aletado na condição de deformado. Neste caso, os recozimentos foram realizados a 500°C por 20 minutos. O forno utilizado para o tratamento térmico foi um forno elétrico tipo mufla, marca Linn, de potência máxima de 18 kW. Em ambos os recozimentos as tiras foram retiradas do forno e resfriadas em água para diminuir o tempo disponível para a formação de óxidos nas superfícies das tiras, pois esse óxido, como ser verá, prejudicará a união na colaminação.

A figura 1 mostra o esquematicamente como um tubo aletado é fabricado. Inicialmente as trias de cobre são escovadas (1a) para retirada de óxidos advindos dos tratamentos térmicos. Utilizou-se uma escova rotativa marca HW, 150 mm de diâmetro com arames de aço, de 2950 rpm. Após a escovação uma máscara de papel (m) é colocada na superfície de uma das tiras, como mostrado em (1b). Em sequência, as tiras são colaminadas (1c) após o que as tiras são recozidas para facilitar a injeção de ar comprimido, através do bico (e), formando um tubo aletado como se vê em (1d), utilizando-se um compressor marca Wayne de pressão 8,8 MPa.

O tipo, a espessura e a gramatura do papel a ser utilizado como máscara, nas colaminações, são muito importantes. Foram testados cinco tipos de papeis, nominalmente: seda 1, seda 2, sulfite, cartolina e cartão. Os melhores resultados foram obtidos com papel de seda 2 com espessura de 0,02 mm e gramatura de 35 g/mm<sup>2</sup>.

As laminações foram realizadas em laminador de laboratório, marca Fröhling, com capacidade de carga de 392 kN, cilindros de laminação de 200 mm de diâmetro, por 250 mm de comprimento e velocidade de laminação de 6,25 m/min. As condições de laminação foram tais que as tiras foram pré-aquecidas a 100 °C para eliminar a umidade das amostras e a luz do laminador foi colocada como 0,2 mm no primeiro passe; 0,1 mm no segundo passe e 0,0 mm nos passes restantes. Obteve-se assim tira colaminada de 0,5 mm de espessura a partir de duas tiras sobrepostas com espessura inicial desta sobreposição de 2,14 mm.

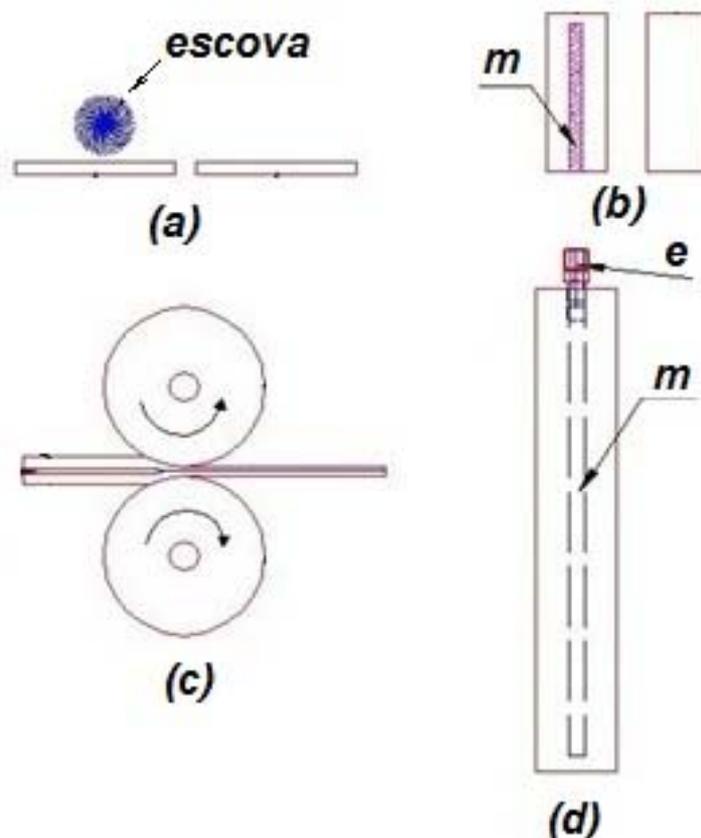


Figura 1: Partes do processo de formação de tubos aletados: (a) escovamento após tratamento térmico, (b) colocação da máscara de papel, (c) colaminação e (d) formação do tubo aletado.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Condições Ótimas de Laminação

A figura 2 mostra a presença de óxidos nos pares de amostras após o primeiro tratamento térmico de recozimento. Como pode se vê marcado por linhas contínuas há aspectos diferentes de oxidação superficial. A quantidade de óxidos formados aumenta com a temperatura de recozimento, como é esperado. Essa camada oxidada deveria ser retirada por escovamento mecânico. Logo, à condição de tratamento térmico a 500°C foi a melhor deste ponto de vista. Embora se esperasse que do ponto de vista da dureza das tiras o melhor seria escolher a tira tratada a 800°C, este fator se torna adverso também do ponto de vista da laminação. Isto porque tendo sido a tira tratada a 800°C a que apresenta a maior quantidade de

óxidos, a retirada desse óxido via escovação mecânica levava a significativo aumento de dureza por encruamento. Logo se laminou apenas tira tratada a 500°C.

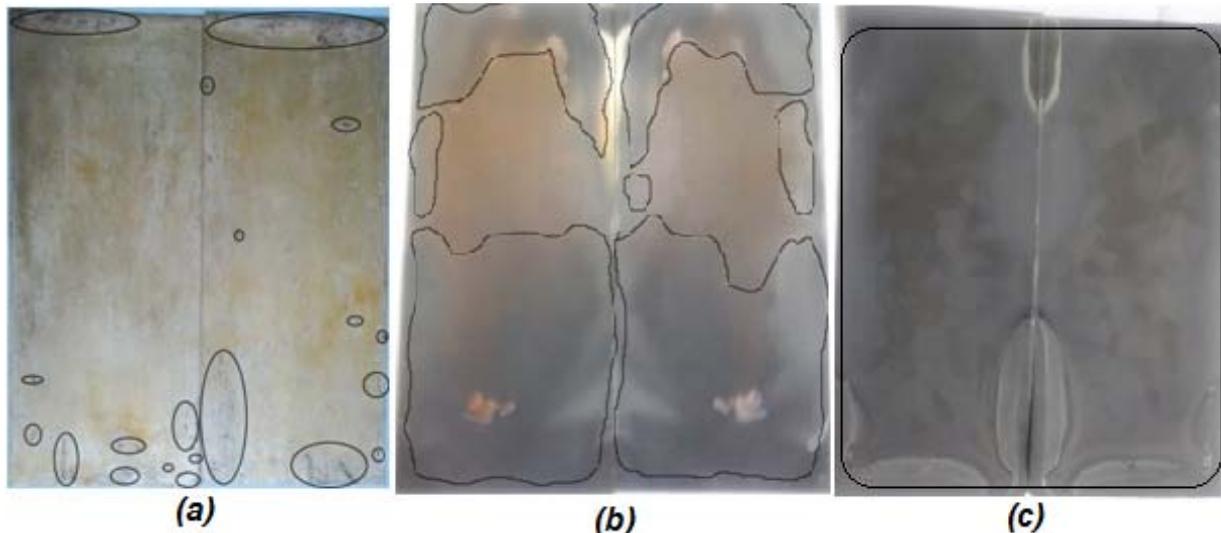


Figura 2: Presença da camada de óxido, delineado por linha contínua na figura, em tiras após tratamento térmico de recozimento à temperaturas de (a) 500°C, (b) 600°C e (c) 800°C.

A Figura 3 mostra o efeito prejudicial que o encruamento devido a escovação mecânica tem sobre a união das tiras e a formação de tubos. As tiras mostradas nesta figura foram tratadas a 600 ou a 800°C, portanto apresentaram a maior quantidade de óxidos sobre suas superfícies, como visto na figura anterior. Também como mencionado, o encruamento dessas tiras após escovamento mecânico se encontrava em seu nível máximo. Atribui-se a esse encruamento o fato de que, no caso da figura 3a sequer ter havido união das tiras e, no caso da figura 3b, apenas união parcial.

As tiras colaminadas tinham, inicialmente, opções de diferentes larguras: 80, 100, 120 e 150 mm. Larguras de 120 e 150 mm exigiam um maior número de passes para atingir espessura final desejada e também as cargas eram mais elevadas. Porém, aparentemente, as pressões de laminação não foram suficientes para produzir união nesses casos. Tiras de 80 e de 100 mm apresentavam curvamentos como mostrados na figura 4. Entretanto as tiras de 100 mm apresentaram com maior frequência curvamentos tanto vertical como lateral relativamente aceitáveis e, por isso, foram as escolhidas para serem laminadas.

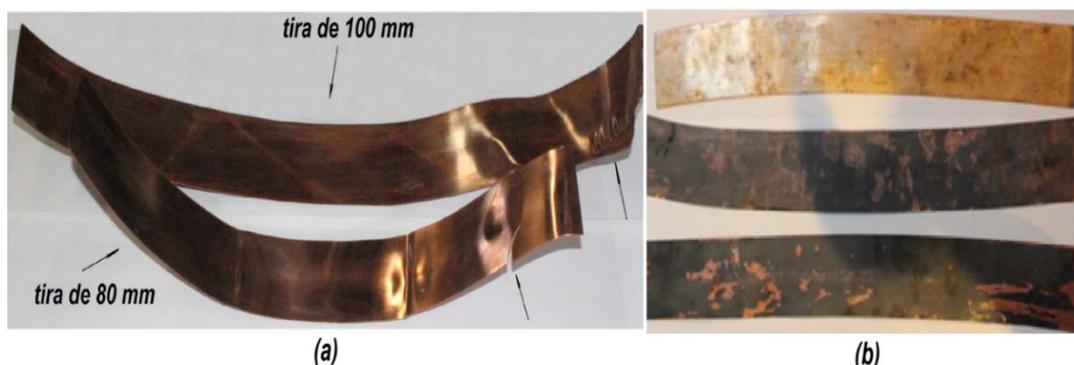


Figura 4. Tiras laminadas mostrando defeitos de curvamentos verticais (a) e laterais (b).

A Figura 5 mostra defeitos comuns devido ao uso de papéis inadequados ao processo de laminação. A figura 5 mostra o caso em que se usou o papel tipo seda 1 (a). Neste caso, o papel era muito macio não suportando a deformação aplicada às tiras sobrepostas, levando ao rasgamento do mesmo. No caso do uso de cartolina (b) ou de cartão (c), defeitos foram produzidos na região central das tiras colaminadas. O fato de esses papéis serem os mais espessos, aparentemente, realça um efeito de coroamento dos cilindros, provocando uma deformação maior no centro das tiras do que nas bordas. O resultado é um aspecto de ondulação central das tiras. Finalmente, no caso de papel tipo seda 2 (d) houve uma combinação de resistência e espessura tal que o papel acompanhou a deformação das tiras sobrepostas e não rasgou.

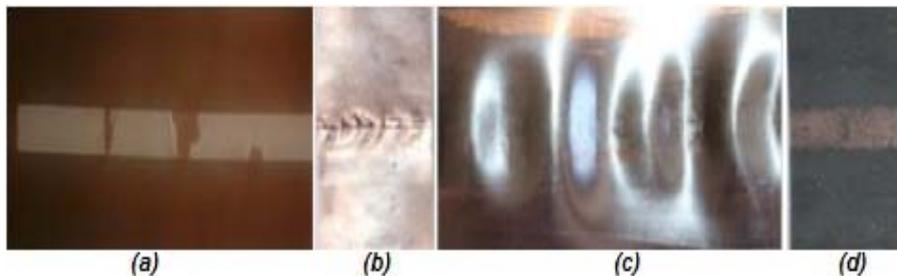


Figura 5: Aspecto superficial de tiras sobrepostas colaminadas quando se usam papéis do tipo seda 1 (a), cartolina (b), cartão (c) e seda 2 (d).

O resultado final, no caso de tiras de 100 mm tratadas a 500°C e uso do papel tipo seda 2 é o que se mostra na figura 6 onde tubos aletados perfeitos foram produzidos com aspecto uniforme e dimensões apropriadas.



Figura 6: Tubos aletados colaminados, tratado a 500 °C com aspecto uniforme.

#### 4 DISCUSSÃO

Da tabela 2 abaixo, pode-se perceber que, se a análise fosse feita, considerando apenas a obtenção de uma boa união, os únicos casos que atenderiam a esta condição seria os casos de larguras iguais a 80 e 100 mm e temperatura de tratamento igual a 500°C. Em todos os outros casos, as uniões ou seriam apenas parcialmente realizadas, ou nem se realizariam. Portanto, o trabalho de se escolher condições ideais de colaminação haveria de se restringir à escolha dessas duas larguras, observados os requisitos de curvamento lateral e de oxidação da superfície. Nas demais amostras, isto é, temperaturas acima de 500°C ou larguras acima de 100 mm, as condições não seriam satisfatórias.

Tabela 2: Resumo dos resultados obtidos fazendo se análise quanto aos aspectos de oxidação, união, e curvamento lateral da tira.

Temp. °C \ Larguras (mm)	500	600	800
150	- pontos de oxidação; - pouca união e; - diminuição do curvamento lateral.	- áreas com oxidação; - sem união e; - diminuição do curvamento lateral.	- aumento de oxidação; - sem união e; - diminuição do curvamento lateral.
120	- pontos de oxidação; - razoável união e; - diminuição do curvamento lateral.	- áreas com oxidação; - poucas uniões e; - diminuição do curvamento lateral.	- aumento de oxidação; - sem união e; - diminuição do curvamento lateral.
100	- pontos de oxidação; - boa união; - pouco curvamento lateral.	- áreas com oxidação; - algumas uniões e; - pouco curvamento lateral.	- aumento de oxidação; - sem união e; - pouco curvamento lateral.
80	- pontos de oxidação; - boa união e; - curvamento lateral.	- áreas com oxidação; - algumas uniões e; - curvamento lateral.	- aumento de oxidação; - raras uniões e; - curvamento lateral.

A figura 7 mostra diagrama representando o conjunto de resultados obtidos nos experimentos realizados neste trabalho.

Como pode ser visto, à medida que a temperatura de tratamento térmico cresce a quantidade de oxidação aumenta significativamente. Por outro lado, se a largura aumenta há, como consequência, dois efeitos contrários, isto é, há uma piora na união, mas por outro lado, há uma maior estabilidade da tira ao passar pelos cilindros e como consequência há um menor encurvamento lateral.

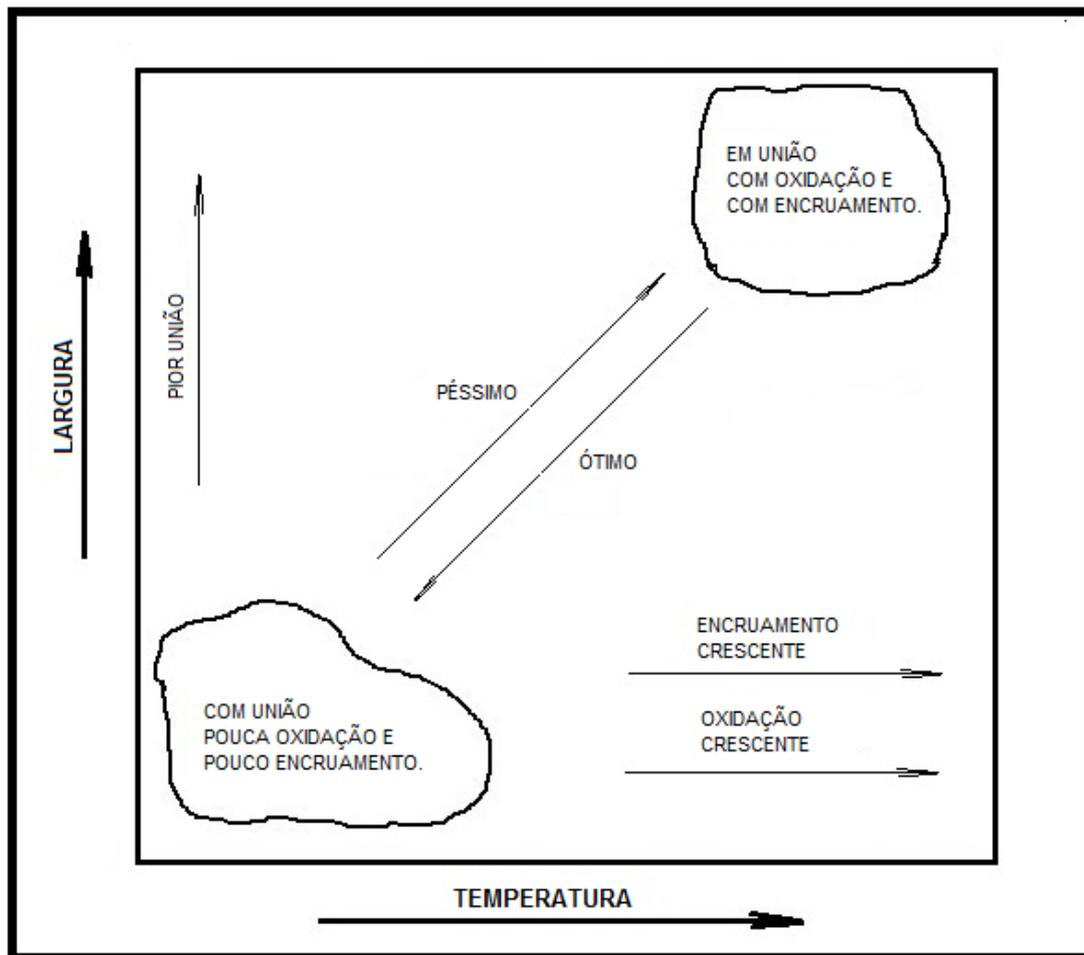


Figura 7: Diagrama representando conjunto de resultados obtidos neste trabalho

#### 4.1 Efeito da Largura

Se a largura aumenta, conseqüentemente a carga e números de passes aumentam e como há limite na carga máxima do laminador tem-se uma união parcial ou não união do par metálico. Logo larguras são menores favorecidas, até certa faixa para não ocorrer o curvamento lateral.

#### 4.2 Efeito da Temperatura

Se a temperatura aumenta a porcentagem de óxido aumenta, logo a escovação tende a aumentar, ocasionando um aumento do encruamento e com isto também a carga aumenta e do mesmo jeito que a largura, originando uniões parciais, logo temperaturas menores são favorecidas.

Deve-se notar aqui que o objetivo principal do trabalho é o de se obter união das tiras colaminadas. Em segundo plano viria à forma final dos colaminados sendo possível se admitir algum desvio de retineidade dos colaminados se não fosse possível eliminação total de desvios laterais.

Entretanto, pode-se concluir do exame da figura 7 que tanto a condição de largura de 80 mm ou a largura de 100 mm, na mesma temperatura atenderia o critério de se obter 100% de união dos colaminados, porém com as tiras de 80 mm ocorreram o curvamento lateral mais acentuado.

## 5 CONCLUSÃO

As conclusões do presente trabalho para condições ideais de colaminação são:

- a) tratamento térmico com temperatura de 500° C devido a menor oxidação e boa deformação plástica;
- b) a escovação deve ser feita apenas levemente superficial sobre as tiras para não causar encruamento demasiado das tiras e;
- c) largura da tira de 100 mm foi escolhida como ótima devido ao menor defeito de forma e melhor aproveitamento físico da matéria-prima de 100 % como adquirida no mercado, sem ocorrer a desperdícios ou perdas de matéria-prima. Dessa forma, o determinante na escolha da largura de 100 mm não foi quesitos meramente técnicos, mas sobretudo os de economia e aproveitamento de matéria-prima.

## Agradecimentos

Os autores agradecem Cnpq, Capes e Fapemig pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 Andery, Paulo R. Pereira: A Colaminação de Metais Diferentes [Tese de Doutorado]. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais; 1997.
- 2 Mohsen, A., Toroghinejad Mohammad R.. Effects of Processing Parameters on the Bond Strength of Cu/Cu Roll-Bonded Strips, Journal of Materials Processing Technology. 2009 [acesso em 25 set 2013]; 4:560-563. Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013609003938>.
- 3 Helman H., Martinez Vidal, C. Unión de Metales por Indentacion. In: Sociedad Argentina Metales. Anales III Jornadas Metalúrgicas; set. 1968; Buenos Aires, Argentina, p. 22.