

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas.

Dissertação de Mestrado

“Definição das Variáveis Operacionais e seus Valores na
Fabricação de Tubos Aletados de Cobre por Colaminação
e sua Aplicação em Coletor Solar”

Autor: Esteveesson Ferreira Miqueletti

Orientador: Prof. Ronaldo Barbosa

Co-Orientador: Prof. José Maria Ramón Caccioppoli

Novembro/ 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas.

Estevesson Ferreira Miqueletti

“Definição das Variáveis Operacionais e seus Valores na
Fabricação de Tubos Aletados de Cobre por Colaminação
e sua Aplicação em Coletor Solar”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia

Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia de Transformação

Orientador: Prof. Ronaldo Barbosa

Co-Orientador: Prof. José Maria Ramón Caccioppoli

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
Novembro/ 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço a tudo...

Um dano irreparável em algum equipamento seria impossível a execução do trabalho proposto...

Agradeço a Todos...

Esta História começa com o saudoso Prof. Horácio Helmam, orientador de doutorado do hoje, Prof. Paulo Andery, a quem devo a inspiração deste meu trabalho.

Pela paciência, ao amigo e Prof. José M. R. Caccioppoli;

à Prof^a. Elizabete Pereira Duarte, pela lição de paciência na obtenção das patentes e, no contorno das dificuldades, à Sônia R. Federman do Inst. Nacional da Propriedade Industrial que me orientou fantasticamente;

à Prof^a. Berenice Mendonça, que me fez aluno do PPGEM;

ao Prof. Ronaldo Barbosa, pelo incentivo nesta caminhada;

aos Profs. Vicente Buono e Luiz Fernando, na entrevista para aluno do PPGEM e pela aceitação de meu trabalho;

ao Prof. Paulo Modenesi, por me orientar na proposta de pesquisa;

ao Prof. Dagoberto, orientando-me sobre tratamento térmico;

aos colegas de trabalho: Aparecida Pacheco e Nelson em como caminhar no PPGEM; Ilda, Andréia, Patrícia, Cláudia Lima, Paulo em colocar seus laboratórios a minha disposição; Cláudia Barros, Gorete, Diego, Filip com material didático;

ao Prof. Herman Mansur, pela autorização de verbas;

ao Prof. Fonte Boa, pelas aulas de energia solar e troca de ideias;

à Prof^a. Maria do Rosário, pela revisão textual deste trabalho;

a Todos da UFMG: Departamento, Escola de Engenharia, Pessoal da limpeza;

a minha família, Ana, Emmanuell e Mário, pela confiança e credibilidade;

aos parentes e colegas, pelos pensamentos positivos;

ao Dr. Celso Charuri e amigos, por me ensinarem a reconhecer que tudo e Todos são importantes.

Agradeço ao TODO...

Pelos inúmeros milagres...e, através de meus pais, Antônio e Wanda, a oportunidade da minha existência e assim, colocar tudo e Todos vocês no rio da minha Vida...

A tudo, a Todos e ao TODO...

Meu Muito Obrigado!

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	13
2 – OBJETIVOS	17
2.1 – Objetivo Geral	17
2.2 – Objetivos Específicos	17
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 – Colaminação	18
3.1.1 – Introdução	19
3.1.2 – Compressão em Estado Plano de Deformação	23
3.1.3 – União em Fase Sólida	28
4 – METODOLOGIA	35
4.1 – Material	35
4.2 – Equipamentos	35
4.3 – Fabricação de Tubos Aletados	38
5 – RESULTADOS e DISCUSSÃO	42
6 – CONCLUSÕES	51
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	54
8 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
9 – ANEXOS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Coletor solar de placa plana	13
Figura 1.2: Detalhe do contato aleta-tubo com a solda de ultrassom	14
Figura 1.3: Processo de fixação placa-tubo dos coletores ensaiados no âmbito do PBE – INMETRO	15
Figura 3.1.2.1: Ensaio Ford	23
Figura 3.1.2.2: Estado de tensões	25
Figura 3.1.2.3: Curva de fluxo	26
Figura 3.1.3.1: Superfície antes da união	29
Figura 3.1.3.2: Tipos de soldagem	30
Figura 3.1.3.3: Representação esquemática do mecanismo de união a frio	32
Figura 4.2.1: Guilhotina de chapa Newton com capacidade máxima de corte de $8,2 \times 10^{-6}$ Mpa	36
Figura 4.2.2: Escova rotativa HW, de 2950 rpm	36
Figura 4.2.3: Laminador Fröhling com capacidade de carga de 392,27 kN	36
Figura 4.2.4: Forno Linn de potência máxima de 18 kW	37
Figura 4.2.5: Compressor Wayne de pressão 8,8 MPa	37
Figura 4.3.1: Esquema de fabricação do tubo aletado	38
Figura 4.3.2: Corte da cauda de uma tira	40
Figura 5.1: Superfície de amostras tratadas a 500 °C. Círculos indicam pontos de oxidação	42
Figura 5.2: Superfície de amostras tratadas a 600 °C. Áreas contornadas mostram áreas de oxidação	43
Figura 5.3: Superfície de amostras tratadas a 800 °C. Área totalmente oxidada	43
Figura 5.4: Tira de cobre de 100 mm de largura colaminadas tratadas a 600 ou 800 °C não unidas devido ao encruamento	44
Figura 5.5: Tubo aletado de 120 mm de largura tratado a 600 °C mostrando a má formação do tubo	44

Figura 5.6: Tubo aletado de 80 mm de largura tratado a 500 °C com boa união, mas com curvamento laterais	45
Figura 5.7: Tubos aletados de 100 mm de largura, tratado a 500 °C com aspecto uniforme para coletor solar	45
Figura 5.8: Placa absorvedora para coletor Solar feita de dez tubos aletados	46
Figura 5.9: Tiras encruada de 80, 100 mm de largura sem alcançar a dimensão final	46
Figura 5.10: Curvamento lateral das tiras de 100 mm de largura	47
Figura 5.11: Papel de seda ¹ de 0,01 mm de espessura rasgado de uma amostra onde não houve união em fase sólida	49
Figura 5.12: Efeito da espessura da máscara de papel sobre as tiras colaminadas. Da esquerda para direita temos: papel de seda ² , cartolina e cartão	50
Figura 5.13: Tira com tensões de tração no centro e tensões de compressão nas bordas	50
Figura 6.1: Diagrama representando conjunto de resultados obtidos neste trabalho	52
Figura 8.1: Tubo aletado em alumínio	57
Figura 8.2: Trocador de calor em alumínio	57

LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1: Dimensões iniciais de largura e comprimento das tiras	40
Tabela IV.2: Tipos de papel, suas espessuras e gramaturas	41
Tabela V.1: Passe de laminação de uma tira de 80x260mm	48
Tabela V.2: Passe de laminação de uma tira de 100x280mm	48
Tabela V.3: Passe de laminação de uma tira de 120x300mm	48
Tabela V.4: Passe de laminação de uma tira de 150x320mm	49
Tabela VI.1: Resumo dos resultados obtidos fazendo-se análise quanto aos aspectos de união, oxidação e curvamento lateral da tira	51

LISTA DE NOTAÇÃO

A :	constante da equação de Ludwik
B :	constante da equação de Ludwik
b :	identador da matriz Ford
d_l :	incrementos infinitesimais de comprimento
d_h :	incrementos infinitesimais de espessura
d_w :	incrementos infinitesimais de largura
gap :	abertura entre cilindros
h :	espessura instantânea
h_i :	espessura inicial
h_f :	espessura final
l :	comprimento instantâneo
l_i :	comprimento inicial
l_f :	comprimento final
m :	constante da equação de Ludwik
S :	tensão de escoamento em Estado Plano de Deformação
V_i :	volume inicial
V_f :	volume final
w :	largura instantânea
w_i :	largura inicial
w_f :	largura final
Y :	tensão de escoamento do metal em tração pura
Δ :	Deformação Volumétrica
ΔV :	variação de volume
\mathcal{E}_p :	deformação plástica verdadeira
\mathcal{E}_l :	deformação verdadeira no sentido do comprimento
\mathcal{E}_h :	deformação verdadeira no sentido da espessura
\mathcal{E}_w :	deformação verdadeira no sentido da largura
σ :	tensão verdadeira

- σ_1 : tensão principal na direção 1
- σ_2 : tensão principal de compressão na direção 2
- σ_3 : tensão principal de compressão na direção 3

RESUMO

Neste trabalho, tiras de cobre foram laminadas para se obterem tubos aletados para construção de coletor solar. 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 à escolha de tiras menos largas. Temperaturas altas também resultaram em baixa união. A melhor condição foi de 100 mm de largura e 500 °C de tratamento térmico.

ABSTRACT

In this work, copper strips were rolled to get tubes to be used in solar collector. 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.

1 - INTRODUÇÃO

Na busca de novos produtos, como também na melhoria dos já existentes, o presente trabalho se propõe a dar uma nova forma e melhores condições às placas absorvedoras de calor para coletor solar de placa plana conforme mostra a figura 1.1, expandida abaixo (ENALTER, 2001). A placa absorvedora de calor é o principal componente de um coletor solar como também de todo o sistema de aquecimento, melhorias nesse componente resultam em aumento do rendimento térmico. Esta nova forma refere-se à fabricação de tubos aletados para placa absorvedora para coletores solares e que também possa ser utilizado para outros equipamentos como trocador de calor. Os tubos aletados foram produzidos por colaminação, a partir de chapas metálicas, através da Patente Industrial (PI) (UFMG, 2006; UFMG, BR, 2008). A colaminação é um processo que reúne ao mesmo tempo, a conformação mecânica e a união em fase sólida. Espera-se um aumento do rendimento térmico em razão de não mais existir o contato entre a placa absorvedora e os tubos, pois será uma só peça, diferente dos coletores convencionais onde as placas absorvedoras são fabricadas em duas peças: os tubos e as aletas, unidas por soldagem ou encaixe.

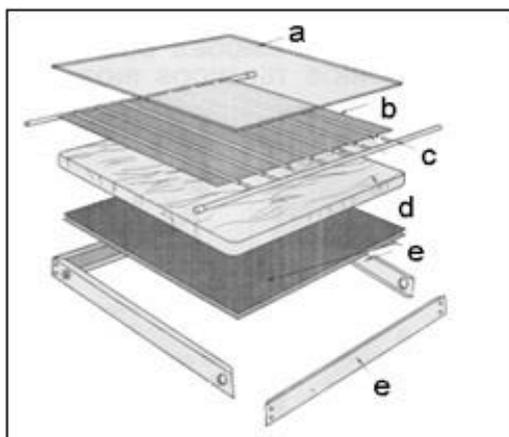


Fig 1.1: Coletor solar de placa plana.

- a) cobertura transparente;
- b) placa absorvedora (*aletas*);
- c) tubos condutores;
- d) isolamento térmico e;
- e) chapa de fundo e perfil metálico.

O tubo aletado tem como função transferir calor de um meio com maior temperatura para outro com temperatura menor. Os seus componentes básicos são os tubos e as

aletas, conforme figura 1.2. Os tubos podem ter seções transversais de diferentes geometrias e as aletas são chapas ou discos fixados ou soldados nas paredes dos tubos, com o objetivo de se obter um sensível aumento da área de transferência de calor e, conseqüentemente, de sua eficiência térmica. Destaca-se que os tubos aletados são empregados na fabricação de coletores de energia solar, reatores nucleares, evaporadores de geladeiras, radiadores de automóveis e aeroplanos, condensadores para refrigeração e em muitas outras aplicações.

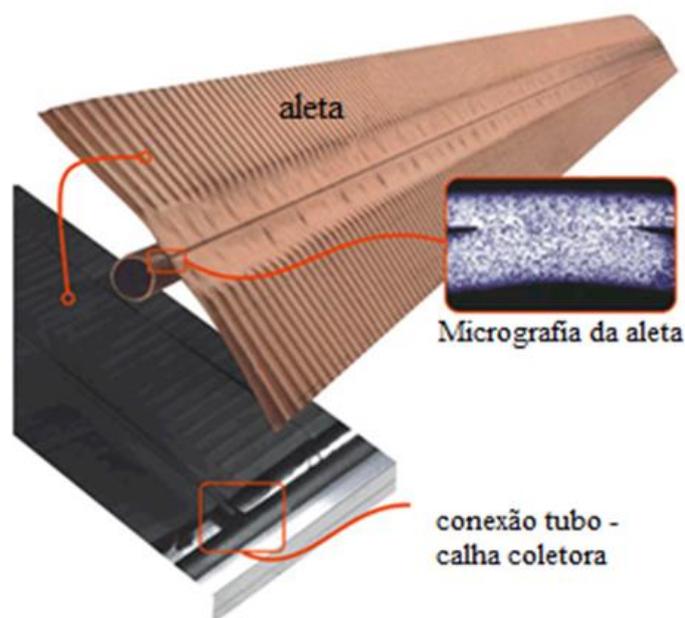


Fig 1.2: Detalhe do contato aleta-tubo com a solda de ultrassom

Fonte: adaptado de <http://www.supersolaquecedores.com.br/?pagina=aquecedor-solar-para-banho01>

O processo de fabricação do tubo aletado, através da PI por colaminação, é um processo de conformação mecânica; é a laminação e, ao mesmo tempo, a soldagem ou adesão, ou seja, a união em fase sólida de metais através dos cilindros de laminação. Na laminação, os metais são submetidos a um processo de conformação mecânica que gera tensões de compressão (HELMAN H., et al., 1993); no caso em questão, é a compressão em estado plano. Essas tensões de compressão ocorrem na região entre os cilindros de laminação que é chamada de arco de contato. Desta forma, quando duas chapas, previamente preparadas, são sobrepostas e entram na região do arco de contato, surgem tensões de compressão, ocorrendo a deformação plástica de ambas as chapas e, segundo alguns pesquisadores, dá-se a união entre elas, também chamada união em fase sólida (TYLECOTE, R.F., 1968).

A união em fase sólida é uma soldagem permanente de metais iguais ou distintos, realizada em determinada temperatura para que não ocorra fusão dos metais. Uma

das explicações mais aceitas (ANDERY, PAULO R. P, 1997) é a de que para se obter a união em fase sólida é necessário haver ligação metálica entre as superfícies a serem unidas. 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 a região do arco de contato, 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 (MOHSEN A., et al, 2009).

E assim, a colaminação cria como resultado uma única peça, sendo esperado um maior fator de remoção de energia pelo fluido de trabalho com significativo aumento de seu rendimento térmico. Desta forma, elimina-se a necessidade de soldagem convencional ou do encaixe dos tubos, utilizado por 66,3% dos coletores ensaiados no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE/INMETRO), segundo Pereira (2009) (FIG 1.3).

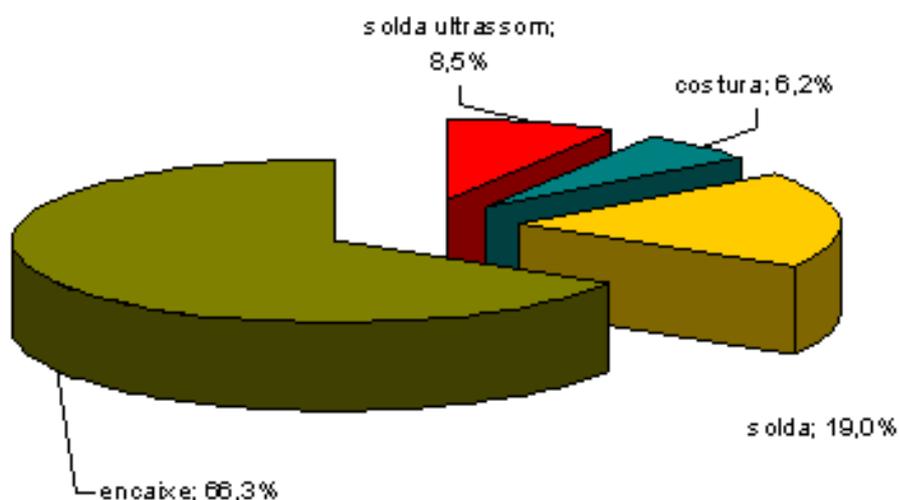


Fig 1.3: Processo de fixação placa-tubo dos coletores ensaiados no âmbito do PBE – INMETRO

É um processo de fabricação de alta produtividade, não havendo limitações no que se refere ao comprimento do tubo, uma vez que no processo de colaminação, por ser do tipo “contínuo”, o comprimento final depende somente do valor inicial e não do equipamento em si. Outra vantagem é a possibilidade de se adotar qualquer diâmetro do tubo, seja para um único ou múltiplos tubos. Portanto, através de duas chapas obtém-se um tubo aletado ou uma placa aletada com múltiplos tubos internos.

A proposta deste trabalho, portanto, foi a de fabricar os tubos aletados de dimensões adequadas, tendo como parâmetros a temperatura de tratamento térmico e a largura das tiras de cobre para que ocorra uma boa união com a formação uniforme dos tubos.

2 - OBJETIVOS

2.1 – Objetivo Geral

Fabricação de tubos aletados pelo processo de conformação mecânica, chamado de colaminação, através da Patente Industrial (PI) (UFMG, 2006; UFMG 2008) para que atenda a fabricação de uma placa absorvedora de calor para coletor solar e também como trocador de calor para outros equipamentos.

2.2 – Objetivos Específicos

Obter as dimensões iniciais e finais adequadas conforme as condições dos equipamentos do laboratório para que não ocorram defeitos na laminação das tiras.

Obter a melhor temperatura de tratamento térmico de recozimento para a melhor união entre as tiras.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Colaminação

Neste capítulo, se faz um breve histórico da colaminação, descrevendo-se a evolução da união em fase sólida; a *Compressão em Estado Plano de Deformação* através do ensaio Ford para simular e formular o processo de laminação de chapas; algumas definições da união em fase sólida, caracterização da união, parâmetros de influência, mecanismo de união, objetivo da união em fase sólida e aplicações e os tipos de união.

A colaminação é um processo misto de conformação mecânica de laminação de chapas planas e a união em fase sólida. A união em fase sólida é uma consequência do processo de laminação que ocorre ao mesmo tempo, devido à compressão na região entre os cilindros de laminação.

3.1.1 – Introdução

A história de unir peças sob pressão tem comprovações deste 1500 a 800 AC, que se encontram nos museus de Ulster em Belfast e no National em Dublin na Irlanda. Existem também peças do Egito antigo no museu Britânico; objetos na Grécia e em Roma (TYLECOTE, F.R., 1968).

Segundo Rollason, a primeira evidência científica de solda a frio sob pressão registrada pelo homem foi em 1724, Rev. J.I. Desaguliers, em uma demonstração para a Sociedade Real, com duas bolas de chumbo, das quais segmentos de $\frac{3}{4}$ de polegadas de diâmetro tinham sido cortadas e foram pressionadas juntas com uma torção, descobriu-se terem-se unido. (ROLLASON, E. C, 1959).

Muitas dessas teorias são baseadas nos trabalhos sobre atrito a seco de Bowder e Tabor (BOWDEN, F.P., TABOR, D., 1968) que tratam das irregularidades superficiais dos metais. Eles propuseram uma interpretação elasto-plástica do mecanismo de atrito seco ou coulombiano, supondo como resultado de um contato a nível microscópico dos metais, que são produzidas soldas microscópicas nas irregularidades superficiais devido a forças de atração ou forças de coesão. Embora pesquisas recentes verificarem que o acabamento superficial (rugosidade) não é o fator determinante do mecanismo de união. Pesquisas realizadas por Lukaskin (ANDERY, PAULO R. P, 1997) concluíram que a formação das irregularidades superficiais é decorrência da criação de bandas e/ou degraus de escorregamento e que esse efeito é mais pronunciado em metais cúbicos de faces centradas e em metais tetragonais. Essas irregularidades formam-se de preferência ao longo dos contornos de grãos, quanto menor o contorno de grão, maior número de bandas de escorregamento e, conseqüentemente, quanto maior o número de irregularidade, maior será os pontos localizados de soldagem. Em outros trabalhos do autor, metais dissimilares apresentam um movimento relativo entre as superfícies devido à diferença de fluxo do metal e as irregularidades aumentam esse movimento que por sua vez, ajuda no processo de união.

Na segunda guerra mundial, acelerou-se o desenvolvimento dessa técnica, principalmente na Alemanha em que os resfriadores de ligas leves para aviação foram soldados sob pressão, em Pantal. Em 1945, na Grã Bretanha, o pioneiro da aplicação de solda a frio foi a Companhia General Electric que realizou seus trabalhos de

pesquisa e desenvolveu equipamentos e preparação de superfícies (ROLLASON, E. C, 1959).

Em 1952, Hofmann e Ruge (TYLECOTE, F.R., 1968) sugeriram que o módulo da pressão exercida sobre os metais seria um fator controlador do processo, independente do nível de deformação imposta ao conjunto e, nesta mesma linha de pesquisa, Mc Ewan e Milner também trabalharam.

Em 1954, Udin et al. (ANDERY, PAULO R. P, 1997) propuseram uma teoria de que o fator determinante do processo de união seria a intensidade das forças de recuperação elásticas dos metais a serem deformados, durante o processo de conformação mecânica e outros pesquisadores como Mac Farlena e Tabor também seguiram essa linha de estudo.

Em 1958, trabalhos como Edman e Jertiner e completado por Semenov (ANDERY, PAULO R. P, 1997) sugeriram que a união em fase sólida está relacionada com ligações metálicas e que a deformação crítica é uma consequência variável do processo de conformação utilizado. Eles propuseram que a deformação crítica existe porque necessita vencer uma barreira de energia que serve para redistribuir os átomos das superfícies de contato, obtendo assim uma configuração atômica específica. Essa configuração é obtida a partir da formação dos contornos de grão na interface a serem unidos. Um aumento da deformação implicaria um aumento da energia do conjunto que, quando superasse a barreira de energia para formação dos contornos de grão a deformação crítica, seria atingida. Não há suporte experimental nesta teoria, mas abriu-se um campo para ligações interatômicas.

Em 1961, Mc Evans e Milner (Mc EVANS e MILNER, 1961) estudaram a influência dos filmes de óxidos no mecanismo de união, particularmente a formação de compostos intermetálicos que podem ser frágeis ou dúcteis. Os compostos intermetálicos frágeis apresentam maior resistência de união em relação aos dúcteis. Por outro lado, o aumento de camadas de composto intermetálico frágil faz decair a resistência de união, o que não ocorre com o composto intermetálico dúctil. Eles também concluíram que os parâmetros que governam a união a frio de metais distintos são os mesmos da colaminação de um mesmo material. As espessuras das camadas de óxidos variam muito para cada tipo de metal. Ciupik realizou medições da ordem de 10 a 40 μm para o alumínio, e de 100 a 150 μm para o cobre. Cada tipo de metal apresenta óxidos frágeis ou dúcteis. Metais como o alumínio apresentam óxido frágil, enquanto o cobre apresenta óxido dúctil.

Em 1968, Helman e Martinez (HELMAN e MARTINEZ, 1968) estudaram a influência da umidade sobre a resistência das uniões e deformações críticas. Eles constataram que a deformação crítica aumenta com o tempo de exposição dos corpos de provas em uma atmosfera de elevada umidade.

Nas décadas de 80 e 90, observações experimentais com microscopia eletrônica pesquisadores como Tylecote, Vaydianath et al., Nicholas, Milner e outros (ANDERY, PAULO R. P, 1997) formularam conclusões a respeito da expansão da superfície pela deformação plástica; a preparação superficial dos metais através do escovamento mecânico e suas conseqüências; e como ocorrem as ligações metálicas no processo de união em fase sólida.

Em 1983, contrariando Hofmann e Ruge, o pesquisador Ciupik (ANDERY, PAULO R. P, 1997), no enfoque da deformação crítica, demonstrou que, não havendo um fluxo plástico dos metais, não há união em fase sólida e que a deformação plástica e não o nível de pressão exercida na superfície é um fator mais decisivo no mecanismo de união. Ele realizou ensaios de indentação que impedia o fluxo plástico dos metais. Pressão da ordem de 3700 MPa não foi capaz de uni-los em fase sólida, já com indentação, sem restrição do fluxo plástico, pressões da ordem de 500 e 1200 MPa foram mais que suficientes para se obter a união em fase sólida.

Em 1991, Yahiro (YAHIRO, 1991) estudou o caso de materiais de durezas diferentes e que torna difícil a união em fase sólida desses metais. Através de técnicas da colaminação, ele aqueceu o metal mais resistente do par, diminuindo sua dureza, chegando à conclusão de que para a colaminação realizada em temperaturas médias se obtém um resultado satisfatório para a união em fase sólida de metais distintos.

Em 1992, Zhang et al. (ZHANG et al., 1992) pesquisaram sobre os recobrimentos eletroquímicos no processo de união. Recobrimentos aderidos à superfície do metal facilitam a quebra do filme de óxidos e contaminantes.

Em 1997, Paulo Andery (ANDERY, PAULO R. P, 1997) estudou o comportamento mecânico de metais distintos a serem laminados, visando à determinação de parâmetros como a distribuição de pressão, carga de colaminação, e análise da influência do coeficiente de atrito e a resistência à deformação dos materiais, estabelecendo uma analogia entre a colaminação e o ensaio de compressão na condição de estado plano de deformações (ensaio Ford) para modelamento matemático da colaminação. Uma de suas conclusões é que as curvas de “tensão vs

deformação” de metais distintos diferem quando um metal é ensaiado isoladamente e quando em conjunto, devido à interação mecânica existente entre eles.

Do acima exposto percebem-se contradições entre as teorias apresentadas e diferentes caminhos para a compreensão do fenômeno de união em fase sólida.

3.1.2 – Compressão em Estado Plano de Deformação

Como mencionado na introdução, o processo de colaminação advém da laminação de chapas, através de cilindros em que os metais são submetidos a um processo de conformação mecânica que gera tensões de compressão, ou seja, *compressão em estado plano*, que acontece na região entre os cilindros de laminação, região esta que é chamada de arco de contato. Para se formular sobre este estado de deformação considera-se que os metais são isotrópicos, homogêneos e contínuos. Trabalhos no sentido de simular e formular o processo de laminação ou forjaria foi o ensaio de deformação plana - ensaio Ford (FIG 3.1.2.1), sugerido por Nadai, estudado por Orowan e instrumentado por Ford, em 1948 (WATTS, A. B., FORD H., 1955).

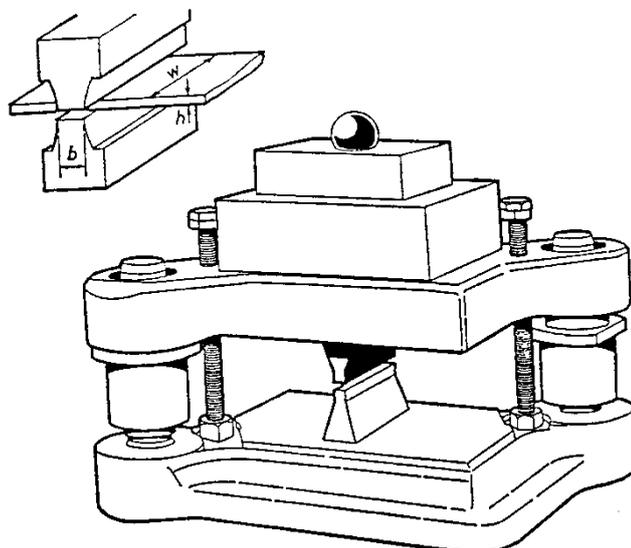


Fig 3.1.2.1: Ensaio Ford.

Este ensaio simula o comportamento de um metal sendo deformado sob pressão, que se mostra através dos dados experimentais num gráfico, chamado de curva de fluxo. Porém a compressão em estado plano somente ocorre quando a largura da chapa é maior que seis vezes a largura do arco de contato dos cilindros ou através da simulação do ensaio Ford onde “b” na figura 3.1.2.1 representa o arco de contato e “h” e “w” são as dimensões da chapa.

Desta forma, a compressão em estado plano (HELMAN H., CETLIN, P., 1993) tem como resposta uma deformação plástica em apenas um plano, ou seja, se olharmos uma chapa pelo lado de seu comprimento e de sua espessura, ela se deformará neste plano, aumentando seu comprimento e diminuindo sua espessura, enquanto sua largura se deforma muito pouco, de maneira quase desprezível, onde se adota para

termos matemáticos iguais a zero. Assim, no processo de deformação plástica, considerando-se a hipótese de constância de volume e somente a mudança de forma, a *Deformação Volumétrica* (Δ) é igual a zero:

$$\Delta = \varepsilon_l + \varepsilon_h + \varepsilon_w = 0 \quad (3.1.2.1)$$

Pela equação 3.1.2.1, a *Deformação Volumétrica* (Δ) é a somatória das deformações verdadeiras (ε_p) - mudança de forma - no sentido do comprimento (ε_l), espessura (ε_h) e largura (ε_w).

Sendo que as deformações verdadeiras são dadas pelas equações 3.1.2.2:

$$\begin{aligned} \varepsilon_l &= \int_{l_i}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_f}{l_i} \\ \varepsilon_h &= \int_{h_i}^{h_f} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_f}{h_i} \\ \varepsilon_w &= \int_{w_i}^{w_f} \frac{dw}{w} = \ln \frac{w_f}{w_i} \end{aligned} \quad (3.1.2.2)$$

Em que dl , dh e dw são incrementos infinitesimais de comprimento, espessura e largura respectivamente, enquanto l , h e w são o comprimento, espessura e largura instantâneos da chapa, respectivamente.

E que: l_i , l_f são comprimentos iniciais e finais respectivamente;

h_i , h_f são espessuras iniciais e finais respectivamente.

w_i , w_f são larguras iniciais e finais respectivamente e;

Conseqüentemente, a variação de volume (ΔV) é razão entre o volume final (V_f) e o volume inicial (V_i), que é igual a um:

$$\Delta V = \frac{V_f}{V_i} = \frac{l_f}{l_i} \times \frac{w_f}{w_i} \times \frac{h_f}{h_i} = 1 \quad (3.1.2.3)$$

Pelo *Estado Plano de Deformação* temos que a deformação no sentido da largura (ε_w) é desprezível, considera-se:

$$\varepsilon_w = 0$$

Finalmente, conclui-se que, de 3.1.2.3:

$$l_f \times h_f = l_i \times h_i \quad (3.1.2.4)$$

Desta forma, através da equação 3.1.2.4, podem-se estimar dimensões iniciais das tiras.

Mas para que se tenha uma resposta adequada de uma chapa (dimensões finais), é necessário aplicar ao material uma solicitação, exercida pelos cilindros de laminação na região do arco de contato e, segundo observações dos pesquisadores, na busca de um modelo matemático para descrever o processo de deformação, eles observaram como as tensões atuam no arco de contato (chapa/cilindros) e no caso de não se aplicar tensões à frente e à ré, a solução segue da maneira abaixo:

Em um plano cartesiano, existe uma tensão de compressão exercida pelos cilindros no sentido vertical sobre o plano da chapa diferente de zero, que se pode denominar de tensão de compressão (σ_3), na direção 3 que é no sentido da espessura da chapa; como não existem tensões à frente e à ré, as tensões na direção 1 são iguais a zero. Esta tensão é chamada de (σ_1) que é no sentido do comprimento da chapa;

Na direção 2, que é o sentido da largura, eles formularam que a parte da chapa que está fora do arco de contato exerce uma tensão no sentido contrário da largura, impedindo que ela se alargue, enquanto a parte que está no arco de contato tende a se alargar; esta tensão que impede o alargamento da chapa é chamada de (σ_2). Pela formulação de Levi e Mises essa tensão vale metade de σ_3 .

A figura 3.1.2.2 mostra o estado de tensões acima descrito.

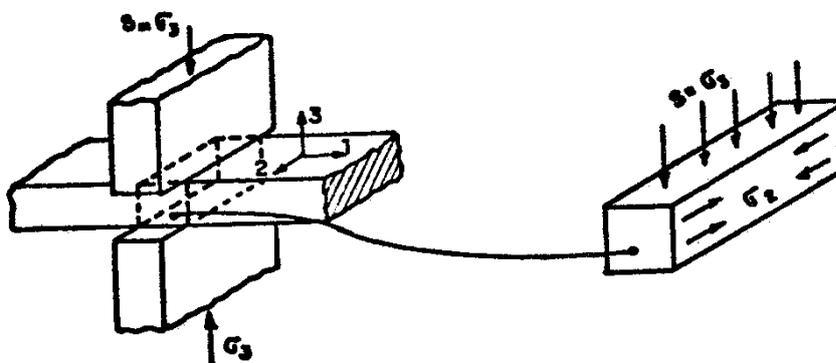


Fig 3.1.2.2: Estado de tensões.

Adotando um critério de escoamento do metal, como por exemplo, de Von Mises e aplicando as tensões descritas pela figura 3.1.2.2, obtém-se:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(-\frac{\sigma_3}{2}\right)^2 + \left(-\frac{\sigma_3}{2}\right)^2 + \sigma_3^2} = Y \quad (3.1.2.5)$$

Em que Y é a tensão de escoamento do metal para tração pura.

Resolvendo a equação acima, resulta:

$$\sigma_3 \cong 1,155 Y \quad (3.1.2.6)$$

Desta forma, conclui-se que a tensão necessária para deformar o metal no Estado Plano de Deformação é 15% maior que a compressão pura.

Como exposto no início, para se reconhecer o comportamento de um metal, quando este se deforma em estado plano, pode-se, através do ensaio Ford, construir um gráfico de uma função: *Tensão verdadeira* (σ) – vs – *Deformação plástica verdadeira* (ε_p), que também se denomina curva de fluxo (FIG 3.1.2.3).

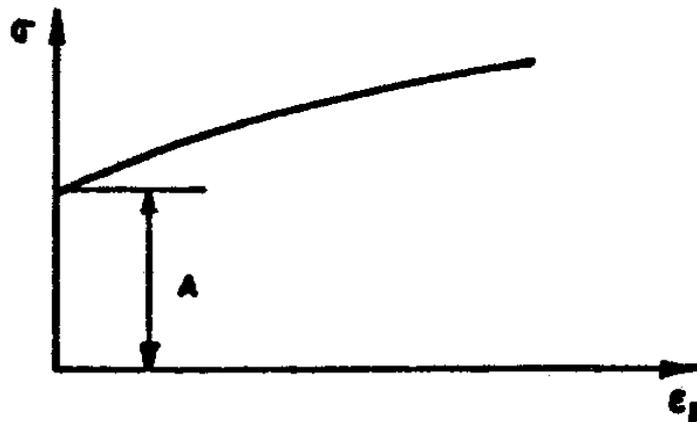


Fig 3.1.2.3: Curva de fluxo.

Realizando o ensaio Ford e obtendo os dados experimentais, procura-se representar analiticamente o comportamento do metal em Estado Plano de Deformação (HELMAN H. et al., 1988). Uma das formas de representar a curva de fluxo do metal é através da equação de Ludwik:

$$S = A + B \cdot \varepsilon_p^m \quad (3.1.2.7)$$

onde S é a Tensão de Escoamento em Estado Plano de Deformação e A , B e m são constantes características para cada metal e ε_p é a deformação plástica do metal. Esta equação deve apresentar o menor desvio possível dos dados experimentais. Um meio de se realizar esta equação é através de um programa computacional do professor

José Maria R. Caccioppoli (UFMG) chamado de “*Lud-ABM*”, um programa simples e eficiente que se aproxima bem dos dados experimentais (CACCIOPPOLI, J.M.R., 1993).

Através da formulação da *Compressão em Estado Plano de Deformação* e do ensaio Ford pode-se, a partir de dimensões finais, obter comprimentos e espessuras iniciais desejados para um tubo aletado ou uma placa aletada, conforme a necessidade de projeto.

3.1.3 – União em Fase Sólida

Várias teorias tentam explicar o mecanismo da união em fase sólida, assim como os parâmetros que influenciam na resistência das uniões formadas, entretanto essas teorias não dão uma explicação satisfatória para o processo de união em fase sólida ou soldagem a frio, sendo às vezes contraditórios os parâmetros analisados, e suas formulações ainda não têm um suporte em observações experimentais, carecendo de maior investigação por parte dos pesquisadores.

Algumas definições:

- A explicação mais aceita para a ocorrência de uma união em fase sólida é de que se faz necessária a ligação metálica entre as superfícies a serem unidas, exigindo-se uma deformação plástica, ou seja, uma deformação crítica que é a deformação mínima necessária para promover a união permanente do par metálico (TYLECOTE, F.R., 1968).
- A literatura internacional consagrou a soldagem em estado sólido em dois termos: “Diffusion bonding” e “Deformation Diffusion Bonding” para designar os processos de união em estado sólido, quando, resultante da pressão aplicada, não houver ou houver, respectivamente, deformação plástica macroscópica dos metais envolvidos (MARCELO GONÇALVES, 1985).
- A união em fase sólida é uma união (solda) permanente de metais iguais ou distintos, realizada em temperaturas tais que não ocorra à fusão dos metais (ANDERY, PAULO R. P, 1997).

A caracterização da união em fase sólida leva em conta a presença de filmes de óxidos, contaminantes e impurezas adsorvidas ou absorvidas na interface entre as superfícies unidas. Os fatores acima descritos são intrínsecos ao processo não sendo possível eliminá-los totalmente. Na figura 3.1.3.1 verifica-se um trabalho de caracterização de superfície realizado por Ciupik em que, mesmo após uma limpeza de uma superfície, ela apresenta várias camadas de “impurezas” antes da união em fase sólida. Essas impurezas, após a união, irão agregar-se na soldagem entre as duas superfícies. Helman e Martinez 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 dessas camadas de impurezas irão fazer parte dos parâmetros da resistência da união.

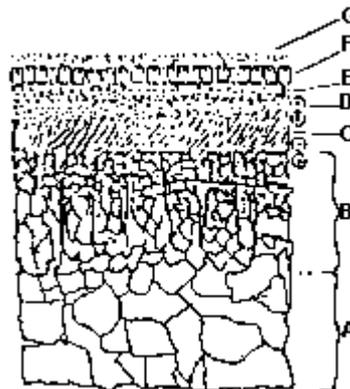


Fig 3.1.3.1: Superfície antes da união.

Camadas da superfície antes da união:

- A – núcleo do material não deformado;
- B – camada formada por veios de óxidos;
- C – camada de óxidos;
- D – moléculas neutras de ar;
- E – moléculas de água;
- F – partículas de graxa e;
- G – partículas ionizadas de pó.

Um parâmetro que influencia na união em fase sólida é a deformação plástica, ou seja, uma deformação plástica mínima necessária para união do par metálico, chamada de deformação crítica. Vários fatores alteram a deformação crítica como: umidade, conformação mecânica, temperatura, recobrimentos, nível de pureza do metal etc, variando também a resistência da solda. Estes parâmetros estão brevemente descritos, conforme abaixo:

Vapor da água: nos estudos de Helman e Martinez sobre a influência da umidade na resistência das uniões e deformações críticas, eles concluíram que a deformação crítica aumenta com o tempo de exposição dos corpos de provas, e que o tempo maior que 10 minutos de espera de união diminui a resistência das uniões. As impurezas ou contaminantes, como: moléculas neutras de ar, moléculas de água, partículas de graxa e poeira ionizadas adsorvidas à superfície vão ter uma preferência a agregarem-se às áreas limpas, inibindo a formação da solda nesses pontos. Eles colocaram as amostras em um recipiente (dessecador) contendo pentóxido de fósforo para controle da umidade e que a deformação crítica diminuía consideravelmente à medida que diminuía a umidade. Chegaram à conclusão de que o provável contaminante era o vapor de água, e que não podia esperar um incremento demasiado no filme de óxido pela exposição das amostras no dessecador, de modo a causar um efeito marcante.

Tipo de conformação mecânica: os pesquisadores observaram que, para um mesmo metal, o valor de deformação crítica varia de acordo com o tipo de conformação. Entre os vários tipos de conformação para a soldagem a frio, os processos de maior relevância industrial são: indentação com matrizes circulares ou tipo Ford (a), soldagem de topo (b), e, em especial, a colaminação (c), (FIG 3.1.3.2).

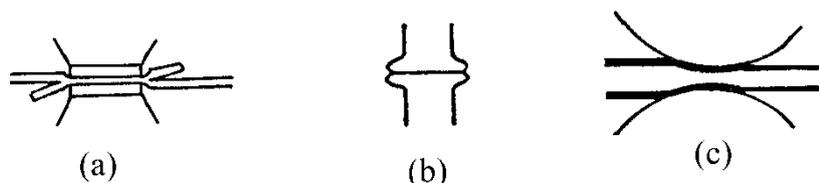


Fig 3.1.3.2: Tipos de soldagem.

Temperatura: Yahiro estudou o caso de materiais de durezas diferentes. Quando a dureza dos metais é muito diferente, torna-se difícil a união. Para contornar esse problema, ele aqueceu o metal mais resistente do par, diminuindo sua dureza. Foi constatado por ele que o aumento da temperatura facilita a evaporação de filmes contaminantes e também a quebra dos filmes de óxidos. Na interfase dos metais deformados forma-se uma zona de transição líquido/sólida devido ao aumento da temperatura gerado pelo atrito e a deformação plástica. Esse aumento de temperatura ocorre na fusão superficial do metal mais macio e torna mais macio o metal mais duro, assim a camada de óxido é “varrida” por essa zona de transição líquido/sólida e a interdifusão acelera a união metálica.

Recobrimentos na superfície: Zhang et al. pesquisaram que recobrimentos eletroquímicos aceleram o processo de união. No caso da indentação ou colaminação, as camadas de óxido e filmes contaminantes são aderidas ao recobrimento e, quando fraturado devido à deformação plástica, deixa exposto o material “virgem”. Recobrimentos à base de níquel são bastante sensíveis ao nível de pressão hidrostática aplicada. Recobrimentos à base de cromo mostraram ser extremamente frágeis.

A pureza do metal: Ciupik (CIUPIK, 1984) estudou que o nível de pureza do metal varia com a deformação crítica. Deformações da ordem de 10% à temperatura ambiente são mais que suficientes para promover a união, porém na prática são necessárias deformações da ordem de 25% para o alumínio de alta pureza, obtida por colaminação e, para o alumínio de pureza comercial, é necessária uma deformação da ordem de 40%.

Outros fatores como: a velocidade, rugosidade, espessura inicial das tiras (Mohsen A., et al, 2009) e diâmetro dos cilindros de laminação influenciam na deformação crítica requerida para início de soldagem e que ela é decrescida pelo uso de grande diâmetro e baixas velocidades dos cilindros.

Após algumas definições, caracterização dos parâmetros da união em fase sólida, pesquisadores como Tylecote, Vaydianath et al., Nicholas, Milner e outros, tendo em vista o mecanismo de união, concluíram conforme segue:

- a) é necessária uma deformação plástica (pelo menos localizada) na interfase dos metais a serem unidos;
- b) a preparação superficial dos metais, através do escovamento mecânico, provoca um encruamento e endurecimento das superfícies, o que fragiliza as camadas superficiais, facilitando a ruptura dos filmes de óxidos;
- c) o escovamento mecânico, seguido de uma deformação plástica, produz a fratura das camadas superficiais, ocorrendo fratura de óxidos na maioria das vezes frágeis e também dos filmes contaminantes. Nestas condições, a deformação plástica produz uma expansão da superfície, surgindo áreas de metal “virgem”, ficando em contato as duas superfícies;
- d) com o aumento da pressão aplicada, aumenta-se a deformação plástica, surgindo novas áreas de metal “virgem”. A pressão é suficientemente alta para impedir a formação de novos filmes de óxidos e a penetração de ar ou gases;
- e) como todo metal apresenta rugosidade superficial, os picos existentes nas áreas de metal “virgem” são “extrudados” na superfície do outro metal, formando pontos de ligação metálica entre os metais. Assim, progressivamente mais “pontos” de união são formados, e películas frágeis são confinadas em pequenas “ilhas”. A figura 3.1.3.3 mostra o mecanismo de união.
- f) análises através de microscopia eletrônica de varredura sugerem que, em cerca de 60% das superfícies de contato entre metais, há rompimento das camadas frágeis dos mesmos e que o restante, em geral, não apresenta óxidos frágeis. Desta forma, ocorrem as ligações metálicas pela ruptura de filmes de contaminantes, ou óxidos menos frágeis e pela eliminação do vapor de água absorvido dessas superfícies provocado pela umidade.

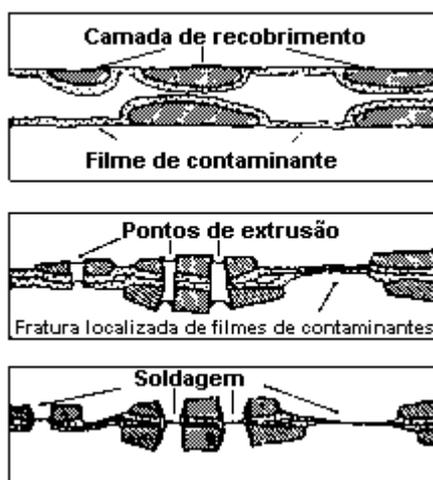


Fig 3.1.3.3: Representação esquemática do mecanismo de união a frio.

Na preparação superficial pelo escovamento mecânico, como dito acima, fica difícil 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. Varia 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 . O nível de modificação da microestrutura dos materiais não foi claramente determinado após o escovamento, além de retirar material de base depositando em outras regiões.

Tratamentos térmicos (ANDERY, PAULO R. P, 1997) também ajudam ou não no processo de união. Materiais mais encruados apresentam uniões mais resistentes que metais recozidos. Devido à facilidade da quebra de óxidos, por outro lado, metais recozidos necessitam menor pressão aplicada para uma mesma deformação. Foram também estudados tratamentos térmicos após a união; e a partir de observações experimentais, constatou-se que, em alguns casos, há um aumento da resistência entre as superfícies e, em outros, há uma diminuição, ou até mesmo, uma ruptura na soldagem das uniões obtidas por colaminação. Alguns pesquisadores supõem que, quando não houver uma união em toda área de contato entre as superfícies, o tratamento térmico aumentaria essas áreas de união. Nos casos em que há uma união por toda área entre as superfícies, ou seja, a ligação metálica, o tratamento térmico não demonstra efeito significativo. Nos casos de ruptura das uniões, as explicações mais aceitas foram que, na interfase entre as superfícies, estas ficaram confinadas em pequenas “bolsas” de gases e que, durante o tratamento térmico, esses gases expandiram-se, ou até mesmo explodiram, ocasionando a ruptura entre as superfícies, sendo este efeito mais comum em metais que apresentam mútua solubilidade. Uma

maneira de medir a união de tiras colaminadas é utilizado o teste de adesão, pesquisadores como Vahid Y., et al (Vahid Y., et al, 2013) realizou trabalhos sobre os efeitos da película de óxido Al_2O_3 e o tratamento de recozimento em tiras de Al-Cu através do teste de adesão e verificou que a resistência de união foi melhorada após a aplicação reduções maiores e diminuiu dramaticamente pelo aumento do filme de óxido.

Diante de certas dificuldades com a união em fase sólida, a pergunta que fica é: qual a intenção de unir chapas metálicas sobre pressão? As intenções por parte dos pesquisadores são a criação de novos materiais e/ou novos produtos com propriedades cada vez mais específicas; ou em situações que o processo de soldagem deve se realizar em temperaturas baixas, para impedir possíveis transformações de fase ou alterações na microestrutura dos metais; ou em situações que as geometrias dos componentes não comportam o processo de soldagem convencional. Em outras situações como revestimentos por eletrodeposição ou eletroquímicos, o processo de união em fase sólida torna-se viável e de alta produção, não sendo necessário metal de adição para união das partes.

Desta forma, pesquisas têm sido feitas para o aprimoramento dos processos de fabricação e uso de novos materiais, no sentido de melhoria da resistência mecânica, resistência à corrosão, qualidade superficial etc, onde nem sempre metais empregados para fabricação de bens atendam a vários requisitos. Por isto, grande parte dos pesquisadores pesquisam novas técnicas de fabricação desses materiais, bem como o desenvolvimento de novas tecnologias ou novos compostos.

Resultado disto, a colaminação surgiu como uma das técnicas na fabricação de materiais compostos, através da soldagem a frio de chapas colaminadas similares ou não, para obtenção de novos produtos.

A exemplo, na construção civil, a produção de chapas bimetálicas de aços estruturais revestidos com uma fina chapa de aço inoxidável onde se verifica a resistência mecânica aliada a resistência à corrosão. Assim, as chapas de cobre-alumínio, aço carbono-alumínio, aço carbono-cobre, fabricadas para painéis e perfis.

Na indústria automobilística, chapas de alumínio e aço inoxidável em vários tipos de acessórios automotivos, como em carrocerias de veículos. O aço proporciona resistência mecânica enquanto o alumínio como anodo de sacrifício para proteção galvânica. Chapas de ferro-alumínio são fabricadas para silenciadores de descarga.

Na indústria eletroeletrônica, refletores para aquecedores elétricos são fabricados em chapas de ferro-alumínio. Comutadores, revestimentos de cabos elétricos e de comunicação são feitos de aço inoxidável colaminadas com cobre. Fios e arames de alumínio e cobre são fabricados cabos para conexão de sistemas de TV e telefone. Combinações de metais preciosos (ouro, prata, platina) com outro metal de base (cobre, bronze, aço carbono ou aço inoxidável) são empregadas para produção de molas de contato elétrico.

Várias combinações como a prata-cobre, níquel-cobre, níquel-ferro e bronze-ferro são utilizadas para produção de moedas.

Na indústria química e petroquímica, chapas de ferro e níquel para reservatórios e dutos em que o níquel funciona como proteção contra corrosão.

Na indústria de eletrodomésticos, dissipadores de calor de refrigeradores e/ou evaporadores são fabricados em chapas de alumínio-alumínio, cobre-cobre e cobre-alumínio.

Este trabalho não visou a análise do processo de união em fase sólida e nem suas teorias, mas buscou avaliar os efeitos da temperatura, oxidação e curvamento lateral das tiras colaminadas para fabricação de tubos aletados.

4 – METODOLOGIA

4.1 - Material

Como a proposta deste trabalho é fabricar tubos aletados em cobre para uma aplicação em coletor solar de área externa num metro quadrado em substituição à placa absorvedora, foi o cobre o metal mais recomendado para a fabricação de coletores solares devido a sua alta condutividade térmica em relação aos metais comuns e por não sofrer corrosão ao longo do tempo.

Os tipos de cobre testados na fabricação destes tubos foram:

- Chapas de cobre fosforoso recozida (UNS C12000) são comercializadas nas dimensões 1200 x 600 x 1,07 mm, sua composição química é 99,90 % mínimo de cobre e 0,004 a 0,012 % de fósforo.
- Bobinas de cobre eletrolítico recozida (UNS C11000) são comercializadas nas dimensões de 600 x 1,07 mm, sua composição química é 99,90 % mínimo de cobre.

4.2 - Equipamentos

O Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola de Engenharia da UFMG conta com um laboratório de conformação mecânica que tem equipamentos para o desenvolvimento dos tubos aletados, tais como guilhotina, laminador, escova rotativa, forno elétrico, compressor e ferramentas.

Os cortes das chapas e das bobinas em forma de tiras foram feitos através da guilhotina de chapa marca Newton, modelo GMN, com capacidade máxima de corte de $8,2 \times 10^{-6}$ MPa. As limpezas das tiras foram realizadas com escova rotativa marca HW, de 2950 rpm. O processo de conformação mecânica de colaminação foi realizado num laminador, marca Fröhling, com capacidade de carga de 392,27 kN, cilindros de laminação de diâmetro de 200 mm, por 250 mm de comprimento e velocidade de laminação de 6,25 m/min. e instrumentado com células de carga. Os tratamentos térmicos de recozimento e os aquecimentos das tiras de cobre foram feitos em forno elétrico, marca Linn, de potência máxima de 18 kW. Os tubos foram inflados através do compressor Wayne de pressão 8,8 MPa. Os equipamentos são mostrados nas figuras 4.2.1 a 4.2.5.

Equipamentos



Fig 4.2.1: Guilhotina de chapa Newton com capacidade máxima de corte de $8,2 \times 10^6$ MPa.



Fig 4.2.2: Escova rotativa HW de 2950 rpm.



Fig 4.2.3: Laminador Fröhling com capacidade de carga de 392,27 kN.



Fig 4.2.4: Forno Linn de potência máxima de 18 kW.



Fig 4.2.5: Compressor Wayne de pressão 8,8 MPa.

4.3 - Fabricação de tubos aletatos

Abaixo são relatados os procedimentos necessários à fabricação de tubos aletados, conforme Patente Industrial - PI (UFMG, 2006; UFMG, BR, 2008). Trata-se, mais especificamente, de fabricação de tubo aletado para trocador de calor a partir de chapas metálicas, unidas em fase sólida por colaminação ou por outros processos de compressão.

A figura 4.3.1 mostra o esquema da fabricação do tubo aletado.

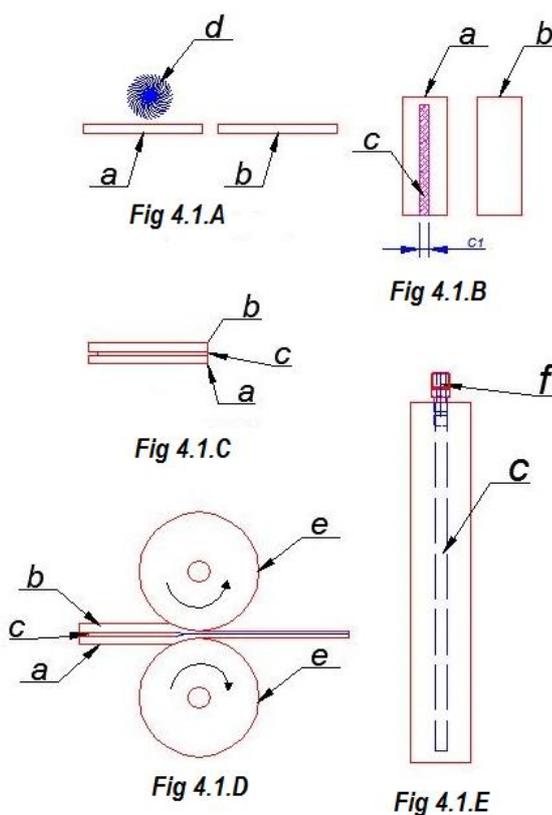


Fig 4.3.1: Esquema de fabricação do tubo aletado.

Esquema da figura 4.3.1:

- 4.1.A – escovação das tiras de cobre “a” e “b” através da escova “d”;
- 4.1.B – colagem da “máscara” “c” sobre a tira “a”;
- 4.1.C – colocação da tira “a” sobre a chapa “b”;
- 4.1.D – colaminação das tiras entre o arco de contato de entrada e saída dos cilindros “e”;
- 4.1.E – formação do tubo através do bico “f” por meio de pressão hidráulica ou pneumática.

Inicialmente, duas tiras metálicas “a” e “b” (figura 4.1.A) receberam um tratamento térmico de recozimento, o que facilita a união das tiras na colaminação. Feito isto, é

retirada camada de óxido de um lado da superfície de cada tira com escova rotativa “d” (figura 4.1.A); esta retirada de óxido também pode ser feita por outros processos, como por exemplo, uma decapagem química. Depois da retirada do óxido, as tiras e máscaras de papel são colocadas no forno a 100°C por 10 minutos para desumidificá-las. Após, é colocada uma máscara “c” (figura 4.1.B) (por exemplo, uma tira de papel) sobre a tira “a” e, em seguida, sobrepõe-se a chapa “b” à chapa “a” e, entre elas, permanece a tira de papel (figura 4.1.C). O conjunto é então submetido a um processo de colaminação (figura 4.1.D). A colaminação produz união das duas tiras, exceto na área onde se encontra papel, gerando o tubo nesta região. No caso específico de laminação, submete-se o conjunto obtido a vários passes de laminação até se obter o comprimento desejado. Ao término da colaminação, o conjunto torna-se uma só peça, logo após a colaminação o conjunto é novamente levado ao forno para novo recozimento. Na região protegida pela máscara “c”, é fixado um bico “f” (figura 4.1.E) e, através desse bico, é injetada pressão hidráulica de óleo, água, ou ar que formará as paredes do tubo.

Dimensões iniciais das tiras

Com o propósito de se obter a melhor união entre as tiras e menores defeitos na laminação das mesmas, as chapas e as bobinas foram cortadas em amostras no formato de tiras de várias larguras: 80, 100, 120 e 150 mm.

Com a intenção de se construir um coletor solar de um metro quadrado de área externa foi necessário objetivar dimensões finais (tubo aletado) desejadas:

- comprimento do tubo: 950 mm
- espessura da aleta: 0,5 mm.

O valor de 0,5 mm é a espessura mínima recomendada para uma aleta de cobre.

O comprimento inicial das tiras foi estimado empiricamente através da equação de *Conservação de Volume em Estado Plano de Deformações*, ou seja, o volume inicial é igual ao volume final quando laminado e, como a largura não varia, obtém-se a equação 3.1.2.4 abaixo:

$$l_f \times h_f = l_i \times h_i$$

Com as dimensões finais dadas acima e a espessura inicial (h_i) de 2,14 mm (duas tiras sobrepostas), o comprimento inicial estimado resulta em:

$$l_i \cong 222 \text{ mm}$$

Entretanto, quando laminadas as tiras, a cabeça e a cauda, apresentam contornos arredondados (FIG 4.3.2) que deverão ser cortados em comprimentos úteis isso pelo fato de os cilindros do laminador se apresentarem levemente em forma de “barril”, também chamado de “coroamento do cilindro”, causando maior deformação no centro das tiras.



Fig 4.3.2: Corte da cauda de uma tira.

Considerando essas perdas por corte, a tabela IV.1 mostra os valores iniciais de largura e comprimento.

Tabela IV.1: Dimensões iniciais de largura e comprimento das tiras.

TIRAS	
LARGURA (mm)	COMPRIMENTO (mm)
80	260
100	280
120	300
150	320

Tratamento Térmico de Recozimento

Esse tratamento é aplicado nas ligas trabalhadas a frio para promover sua recristalização e, em consequência, o amaciamento. Dependendo das ligas, as temperaturas variam de 260°C a 650°C e, para o metal cobre, é de 425°C a 815°C (Chiaverini, Vicente, 1986). Desta forma, tendo o cobre eletrolítico como metal puro e o cobre fosforoso com pequenas impuras de fósforo, conjuntos de amostras de tiras foram tratadas termicamente em forno, a temperaturas de 500, 600 e 800 °C por 20 minutos, sendo resfriadas em água sob temperatura ambiente.

Colaminação

Quanto às condições ambientais, como não é possível manter o laboratório com baixa umidade e isento de poeira, as tiras foram colaminadas à temperatura um pouco acima de 100 °C, o que eliminou a necessidade de controle de umidade. Por um lado, buscou-se uma otimização do comprimento da tira, pois tiras muito compridas exigem um tempo maior de escovação, ocasionando absorção de umidade e maior contato com a poeira. A colaminação foi realizada sem lubrificação entre cilindro e tira, pois isso provoca contaminação sobre as superfícies das tiras escovadas.

Quanto à abertura entre cilindros (“gap”), para se obter a menor abertura entre cilindros, as tiras foram chanfradas nas pontas. Para se alcançar a deformação máxima e a condição de mordida e arrastamento das tiras pelos cilindros, foram feitos testes da espessura inicial da tira de 2,14 mm, iniciando com “gap” com cilindros fechados, ou seja, “gap” igual a “zero”, variando de 0,05 a 0,05 mm até o valor de 0,2 mm, aonde ocorreu a mordida e o arrastamento das tiras. Desta forma, as amostras no primeiro passe foram colaminadas com abertura entre cilindros “gap” de 0,2 mm. No segundo passe, a abertura de 0,1 mm e o restante dos passes sem abertura dos cilindros o “gap” igual a 0,0 mm. Em cada passe de laminação as deformações verdadeiras de comprimento (ε_l) e espessura (ε_h) foram calculadas pelas equações 3.1.2.2:

$$\varepsilon_l = \int_{l_i}^{l_f} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_f}{l_i} \quad \varepsilon_h = \int_{h_i}^{h_f} \frac{dh}{h} = \ln \frac{h_f}{h_i}$$

Papel

O papel, a máscara, apresenta duas funções: a de não deixar haver união das tiras nessa região e a formação do tubo. A tabela IV.2 abaixo mostra alguns tipos de papel que foram testados com suas espessuras e gramaturas.

Tabela IV.2: Tipos de papel, suas espessuras e gramaturas.

TIPOS de PAPEL	ESPESSURA (mm)	GRAMATURA (g/m ²)
SEDA 1	0,01	20
SEDA 2	0,02	35
SULFITE (A4)	0,08	75
CARTOLINA	0,15	200
CARTÃO	0,28	300

5 – RESULTADOS e DISCUSSÃO

As amostras de cobre eletrolítico não obtiveram em sua grande maioria uma união satisfatória, o que levou à desistência deste tipo de cobre. Observou-se que as camadas de óxido ficaram mais aderentes à superfície, isto, talvez, devido às temperaturas de tratamento térmico. Já as amostras em cobre fosforoso obtiveram bons resultados como mostrado abaixo.

Tratamento Térmico

As tiras, que foram tratadas nas temperaturas de 600 e 800 °C, apresentaram grande dificuldade na retirada das camadas de óxido através da escova rotativa, devido a formação de óxido dúctil porque são mais aderentes à superfície, e conseqüentemente ocorreu um encruamento demasiado na superfície, prejudicando uma união total ou mesmo parcial entre as tiras. A escovação deve ser levemente superficial sobre a tira para retirada de óxidos e contaminantes, pois à medida que aumenta a pressão da escova sobre a tira, aumenta o encruamento. A temperatura de 500 °C apresentou menor área de óxidos e facilidade de retirada dos mesmos, além de uma deformação plástica aceitável e menor encruamento provocado na escovação.

As figuras 5.1 a 5.3 mostram a presença da camada de óxido resultante do tratamento térmico do par das tiras de cobre fosforoso. O par de amostras das tiras tratadas termicamente a 500 °C apresentou pequenos pontos de oxidação em sua área. No caso do par tratado a 600 °C, aumentou-se demasiadamente a área oxidada e, por último, o par tratado a 800 °C ficou totalmente oxidado.



Fig 5.1: Superfície de amostras tratadas a 500 °C. Círculos indicam pontos de oxidação.



Fig 5.2: Superfície de amostras tratadas a 600 °C. Áreas contornadas mostram áreas de oxidação.



Fig 5.3: Superfície de amostras tratadas a 800 °C. Área totalmente oxidada.

A grande maioria das tiras que foram tratadas termicamente a 600 ou a 800 °C colaminadas não tiveram uma união entre elas, logo no primeiro passe, como mostrado na figura 5.4.



Fig. 5.4: Tira de cobre de 100 mm de largura colaminadas tratadas a 600 ou 800 °C não unidas devido ao encruamento.

Já em outros pares de amostras de tiras tratadas na mesma temperatura ocorreram uniões parciais ao longo do conjunto colaminado, causando má formação do tubo, como mostrado na figura 5.5.



Fig 5.5: Tubo aletado de 120 mm de largura tratado a 600 °C mostrando a má formação do tubo.

A figura 5.6 mostra um tubo aletado de 80 mm tratado a 500 °C com boa união, mas com curvamento laterais indicado pelas setas.



Fig 5.6: Tubo aletado de 80 mm de largura tratado a 500 °C com boa união, mas com curvamento laterais.

O par de tiras tratado a 500 °C apresentou uniões satisfatórias, a figura 5.7 mostra o formato de tubos aletados de 100 mm de largura com aspecto uniforme e dimensões apropriadas à montagem em um coletor solar de 1 m² de área externa.



Fig 5.7: Tubos aletados de 100 mm de largura, tratado a 500 °C com aspecto uniforme para coletor solar.

E, finalmente, a figura 5.8 mostra uma placa absorvedora, feita de dez tubos aletados pronta para ser instalada em um coletor solar.



Fig 5.8: Placa absorvedora para coletor solar feita de dez tubos aletados.

Colaminação

O ideal é que se atinjam as dimensões finais (comprimento e espessura) com o menor número de passes, pois à medida que aumenta o número de passe, conseqüentemente aumenta o encruamento por deformação plástica, deixando-as arqueadas, tornando difícil a laminação. A figura 5.9 mostra as tiras encruadas de 100 e 80 mm de largura, tratadas a 600 °C, sem alcançar a dimensão final, ocorrendo ou o deslizamento da tira (100 mm), batendo nos mancais de rolamento, ou a fratura da tira (80 mm).

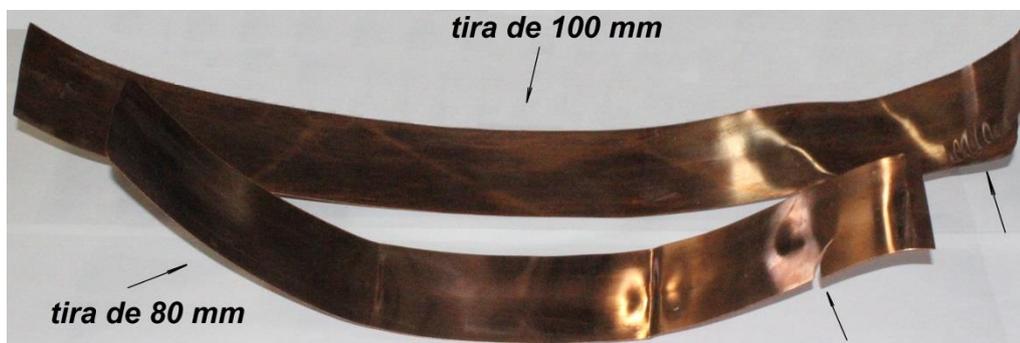


Fig 5.9: Tiras encruadas de 100, 80 mm de largura, tratadas a 600 °C sem alcançar a dimensão final.

No processo de colaminação, houve a necessidade de se escolher a melhor largura de tira, pois a abertura se manteve constante em cada passe para todas as larguras e à

medida que se aumenta a largura da tira, a carga de laminação aumenta. Para uma largura acima de 120 mm requer cargas mais elevadas e tiras com larguras inferiores a 100 mm deslizaram ao longo da mesa dos cilindros. O melhor resultado foi obtido com tiras na largura de 100 mm, nas quais ocorreu melhor união em fase sólida. Acima desta largura, várias amostras apresentaram regiões de falhas nas uniões. Para a largura de 100 mm, obteve-se também o melhor aproveitamento da chapa, não havendo sobra de material.

Foram necessários vários passes de laminação, que dependendo da largura o número de passes aumenta como se relata abaixo. As tiras de 80 mm de largura exigiram três passes, tendo boa união entre as mesmas, apresentando, contudo, deslizamento na mesa dos cilindros e, por isso, saindo com curvamento laterais.

As tiras de 100 mm de largura necessitaram de três a quatro passes, sendo que a maioria mostrou boa união e diminuição do curvamento lateral, porém algumas amostras saíram com curvamento lateral, conforme mostra a figura 5.10. Já as tiras de 120 e 150 mm reclamaram mais de cinco passes, sendo que a grande maioria resultou em uniões parciais entre si, ocorrendo má formação do tubo e, até mesmo, ausência de união das tiras.



Fig 5.10: Curvamento lateral das tiras de 100 mm de largura.

As tabelas V.1 a V.4 mostram dados de passes de laminação de algumas amostras de tiras, no caso tiras de cobre fosforoso, com suas respectivas cargas de laminação do primeiro passe.

Tabela V.1: Passe de laminação de uma tira de 80x260mm

Passe	l_i (mm)	l_f (mm)	$Def. l$ (%)	h_i (mm)	h_f (mm)	$Def. h$ (%)	Gap (mm)	<i>Carga de Laminação no primeiro passe (KN)</i>
1	260	460	57,05	2,14	1,30	49,84	0,20	107,51
2	460	790	54,08	1,30	0,82	46,08	0,10	
3	790	985	22,06	0,82	0,53	43,64	0,00	
DEFOR.TOTAL			133,20			139,57		

Tabela V.2: Passe de laminação de uma tira de 100x280mm

Passe	l_i (mm)	l_f (mm)	$Def. l$ (%)	h_i (mm)	h_f (mm)	$Def. h$ (%)	Gap (mm)	<i>Carga de Laminação no primeiro passe (KN)</i>
1	280	490	55,96	2,14	1,34	46,81	0,20	134,02
2	490	680	32,77	1,34	0,88	42,05	0,10	
3	680	890	26,91	0,88	0,61	36,65	0,00	
4	890	990	10,65	0,61	0,50	19,89	0,00	
DEFOR.TOTAL			126,29			145,40		

Tabela V.3: Passe de laminação de uma tira de 120x300mm

Passe	l_i (mm)	l_f (mm)	$Def. l$ (%)	h_i (mm)	h_f (mm)	$Def. h$ (%)	Gap (mm)	<i>Carga de Laminação no primeiro passe (KN)</i>
1	300	450	40,55	2,14	1,36	45,33	0,20	252,37
2	450	645	36,00	1,36	0,91	40,18	0,10	
3	645	780	19,00	0,91	0,67	30,62	0,00	
4	780	890	13,19	0,67	0,52	25,34	0,00	
5	890	940	5,47	0,52	0,41	23,77	0,00	
6	940	970	3,14	0,41	0,38	7,60	0,00	
DEFOR.TOTAL			117,35			172,84		

Tabela V.4: Passe de laminação de uma tira de 150x320mm

Passe	l_i (mm)	l_f (mm)	$Def. l$ (%)	h_i (mm)	h_f (mm)	$Def. h$ (%)	Gap (mm)	<i>Carga de Laminação no primeiro passe (KN)</i>
1	320	505	45,62	2,14	1,45	38,92	0,20	330,84
2	505	685	30,49	1,45	1,05	32,28	0,10	
3	685	810	16,76	1,05	0,82	24,72	0,00	
4	810	890	9,42	0,82	0,66	21,71	0,00	
5	890	930	4,40	0,66	0,55	18,23	0,00	
6	930	960	3,17	0,55	0,48	13,61	0,00	
DEFOR. TOTAL			92,87			95,93		

l_i : comprimento inicial;

l_f : comprimento final;

$Def. l$: deformação verdadeira do comprimento da tira;

h_i : espessura inicial da tira;

h_f : espessura final da tira;

$Def. h$: deformação verdadeira da espessura da tira e;

Gap : abertura entre cilindros.

Papel

Quanto mais fino o papel, menos suportava a deformação juntamente com a tira, rasgando-se. A figura 5.11 mostra detalhe do papel de seda1 de 0,01 mm de espessura rasgado de uma amostra onde não houve união em fase sólida.



Fig 5.11: Papel de seda1 de 0,01 mm de espessura rasgado de uma amostra onde não houve união em fase sólida.

A figura 5.12 abaixo mostra o efeito da espessura de três tipos de papel, da esquerda para a direita: papel de seda2, cartolina e cartão. De um modo geral, quanto mais espesso o papel, pior a colaminação, originando defeitos no centro das tiras colaminadas, conforme a figura em que mostra o papel de seda2 sem causar defeitos na região central da tira.

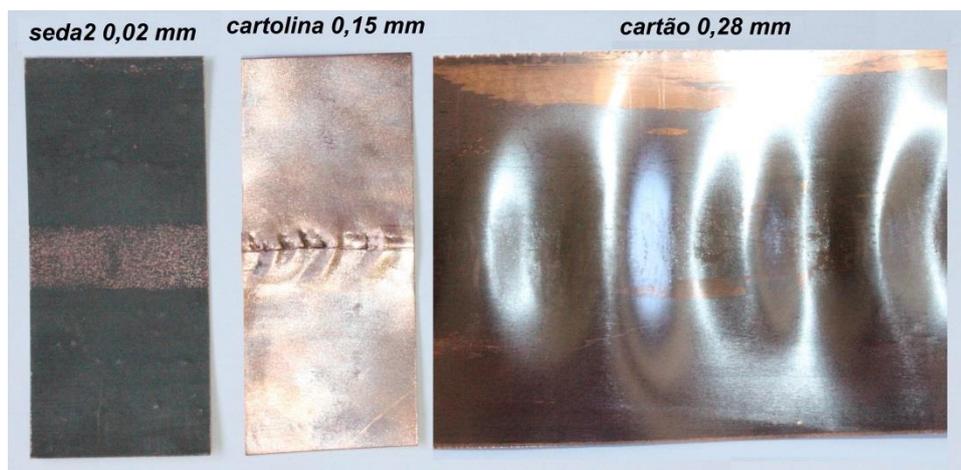


Fig 5.12: Efeito da espessura da máscara de papel sobre as tiras colaminadas. Da esquerda para direita temos: papel de seda2, cartolina e cartão.

Isso é causado pelo motivo de a região central ficar mais espessa por causa da máscara de papel que se deforma mais e colabora também pelo coroamento do cilindro. Assim a tira apresenta tensões de tração no centro e tensões de compressão nas bordas, conforme figura 5.13.

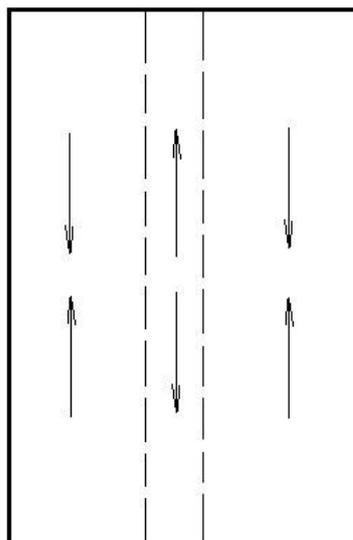


Fig 5.13: Tira com tensões de tração no centro e tensões de compressão nas bordas.

Os resultados mais satisfatórios foram apresentados pelo papel de seda2 com espessura de 0,02 mm. Observou-se que esse papel deformava-se na mesma razão da tira metálica. Desta forma, papeis com dimensões de 300 mm de comprimento e 15 mm de largura foram utilizados nos experimentos. As tiras de papel foram desumidificadas, juntamente com as tiras das chapas no forno.

6 - CONCLUSÕES

Análise preliminar dos resultados

Da tabela abaixo, pode-se perceber que, se a análise fosse feita, considerando-se apenas a obtenção de uma boa união, os únicos casos que atenderiam a esta condição seria o caso de larguras iguais a 80 e 100 mm e temperatura de tratamento igual a 500 °C. Em todos os outros casos, as uniões ou eram apenas parcialmente realizadas, ou nem se realizavam. 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 foram satisfatórias.

Os resultados obtidos e relatados na seção anterior podem ser resumidos, conforme mostrado na tabela VI.1 abaixo.

Tabela VI.1: Resumo dos resultados obtidos fazendo-se a análise quanto aos aspectos de união, oxidação e curvamento lateral da tira.

TEMP.°C LARGURAS(mm)	500	600	800
150	PONTOS DE OXIDAÇÃO, POUCA UNIÃO , DIMINUIÇÃO DO CURVAMENTO LATERAL.	ÁREAS COM OXIDAÇÃO, SEM UNIÃO, DIMINUIÇÃO DO CURVAMENTO LATERAL.	AUMENTO DE OXIDAÇÃO, SEM UNIÃO, COM DIMINUIÇÃO DO CURVAMENTO LATERAL.
120	PONTOS DE OXIDAÇÃO, RAZOAVÉL UNIÃO, DIMINUIÇÃO DO CURVAMENTO LATERAL.	ÁREAS COM OXIDAÇÃO, POUCAS UNIÕES, COM DIMINUIÇÃO DO CURVAMENTO LATERAL.	AUMENTO DE OXIDAÇÃO, SEM UNIÃO, COM DIMINUIÇÃO DO CURVAMENTO LATERAL.
100	PONTOS DE OXIDAÇÃO, BOA UNIÃO, POUCO CURVAMENTO LATERAL.	ÁREAS COM OXIDAÇÃO, ALGUMAS UNIÕES, COM POUCO CURVAMENTO LATERAL.	AUMENTO DE OXIDAÇÃO, SEM UNIÃO, COM POUCO CURVAMENTO LATERAL.
80	PONTOS DE OXIDAÇÃO, BOA UNIÃO, COM CURVAMENTO LATERAL.	ÁREAS COM OXIDAÇÃO, ALGUMAS UNIÕES, COM CURVAMENTO LATERAL.	AUMENTO DE OXIDAÇÃO, RARAS UNIÕES, COM CURVAMENTO LATERAL.

A figura 6.1 mostra diagrama, representando o conjunto de resultados obtidos nos experimentos realizados neste trabalho.

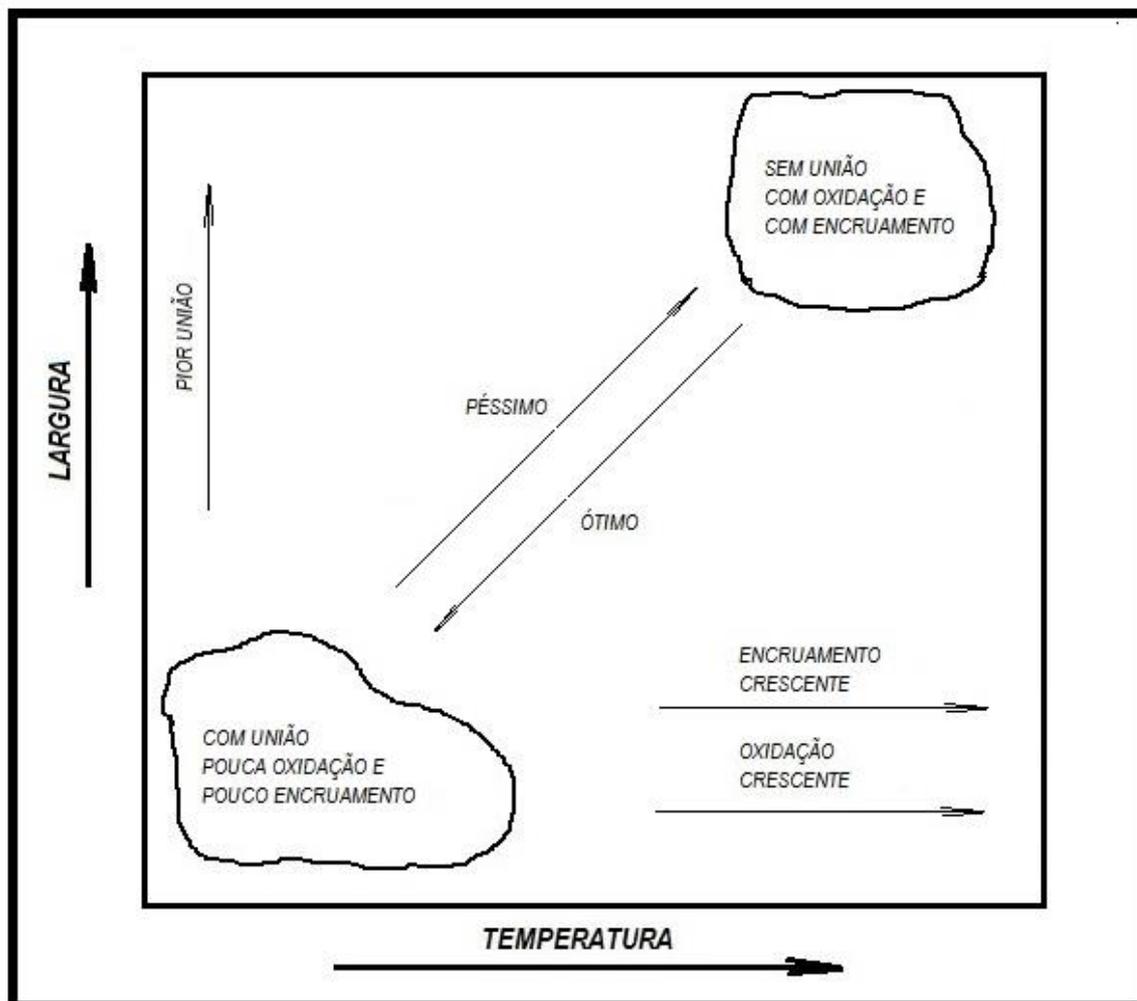


Fig 6.1: Diagrama representando conjunto de resultados obtidos neste trabalho

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 das tiras aumenta, ocorrem dois efeitos opostos: pior se mostra a qualidade da união, enquanto se verifica maior estabilidade da tira na passagem pelos cilindros, ocasionando um menor encurvamento lateral.

Efeito da largura:

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

Efeito da temperatura:

Se a temperatura aumenta, a porcentagem de óxido aumenta, logo, a escovação tende a aumentar, ocasionando maior encruamento e, com isto também, aumento da carga, originando uniões parciais, assim, temperaturas menores são favoráveis.

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

Entretanto, ao exame da figura 6.1, pode-se concluir que, tanto nas larguras de 80 mm e/ou 100 mm, à mesma temperatura, atenderia o objetivo de se alcançar 100 % de união dos colaminados; porém, com as tiras de 80 mm ocorreu o curvamento lateral mais acentuado.

Portanto, a largura de 100 mm foi apontada como ótima, pelo aproveitamento físico de 100% da matéria-prima conforme adquirida no mercado, isto é, sem ocorrência de desperdícios ou perdas, e, ainda, por se conseguir montar um coletor solar com apenas 10 tubos, obtendo-se assim, um coletor otimizado de 1 m², que é o tamanho mínimo para se testar em campo.

Dessa forma, o determinante na escolha da largura de 100 mm não foram os quesitos meramente técnicos, mas, sobretudo, os de economia e de montagem do produto final.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIA

ANDERY, PAULO R. PEREIRA. A Colaminação de Metais Diferentes; União em Fase Sólida pela Aplicação de Deformações. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 12/1997. 319p (Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica).

BOWDEN, F.P., TABOR, D. Symposium on Properties of Metallic Surfaces. Proceedings of the Institution of Metals, p. 197-212, 1952. Citado por **TYLECOTE, R.F. The Solid Phase Welding of Metals**, 1st edition, New York: St. Martin's Press, 1968, 333p.

CACCIOPPOLI, JOSÉ M. R. Laboratório de Conformação Mecânica – Roteiros de aulas Práticas (EMT.34). Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG. 1993. p133.

CHIAVERINI, VICENTE. Tecnologia Mecânica, 2^a edição. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. p 389.

CIUPIK, L. Mechanism of cold Deformation Bonding of Metals During their Simultaneous Plastic Flow. Avanced Technology of Plasticity, vol. 1, 1984, p. 133-138.

ENALTER, "Aquecedores Solares"; Catalogo Técnico - Informativo. Nova Lima (MG): Enalter - Tecnologia em Aquecimento e Conservação de Energia, 2001. 8p.

GONÇALVES, MARCELO. A Soldagem no Estado Sólido: Uma Revisão Teórica. In: Encontro Nacional de Técnicas de Soldagem, 1985. Rio de Janeiro, Brasil. p323-341.

HELMAN H., CETILN, P.R. Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais, 2^a edição. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, 1993. p167.

HELMAN H., et al. Fundamentos da Laminação – Produtos Planos, Cursos – ABM, 1988, São Paulo, p396.

HELMAN H., MARTINEZ VIDAL, C. Unión de Metales por Indentacion. In: IV Jornadas Metalúrgicas Sam. **Aneles**, nov. 1970, Córdoba, p.10.

McEWAN, K.J.B., MILNER, D.R. Pressure Welding of Dissimilar Metals. London: British Welding Journal, jul. 1961, p. 406-420.

MOHSEN A., et al. Effects of Processing Parameters on the Bond Strength of Cu/Cu Roll-Bonded Strips, Journal of Materials Processing Technology, nov. 2009, p. 560-563.

PEREIRA, Elizabeth Marques Duarte (2009) Aplicações da Energia Solar Térmica
In: 1ª Conferência de Energias Renováveis para o Ensino da Engenharia. FAAP – USP 2009, São Paulo.

ROLLASON, E. C.. Pressure Welding of Metals. London: British Welding Journal. Jan. 1959, 1-4p.

TYLECOTE, F.R. THE SOLID PHASE WELDING OF METALS. 1st edition, New York: St. Martin's Press, 1968, 333p.

UFMG, BELO HORIZONTE-MG, MIQUELETTI, ESTEVESON F., CACCIOPPOLI, JOSÉ M. R., PEREIRA, ELIZABETH M. D., Placa aletada para trocador de calor, a partir de chapas metálicas, unidas em fase sólida por colaminação ou por outro processo de compressão. C.I. F28D 1/047, F28D 1/047, F28D 1/053, BR PI0602254-5, 26 maio 2006, Revista de Propriedade Industrial, Rio de Janeiro, n. 1857, 08/08/2006.

UFMG, BELO HORIZONTE-MG, MIQUELETTI, ESTEVESON F., CACCIOPPOLI, JOSÉ M. R., PEREIRA, ELIZABETH M. D., Winglet plate for heat exchanger built on metal bonded in solid phase by colamination. C.I. F28F 3/14, B23P 19/00, PTC/BR2007/000161, BR PI0602254-5, WO 2008/003151 A1, 10 January 2008, Word Intellectual Property Organization, 10/01/2008.

VAHID Y. et al. The Effects of Oxide Film and Annealing Treatment on the Bond Strength of Al–Cu Strips in Cold Roll Bonding Process, Journal of Materials Processing Technology, feb. 2013, p. 174-181.

ZHANG, W., BAY, N., WANHEIM, T. Influence of Hydrostatic Pressure in Cold Pressure Welding. CIRP Annals, vol. 41 n. 1, 1992, p. 293-297.

WATTS, A. B., FORD, H.. An Experimental Investigation of the Yield of Stress Curve for a Metal. London: Proc. Inst. Of Mechanical Engineers, vol. 169, 1955, p. 1141-1149.

WYLEN, GORDON J. VAN e SONNTAG, RICHARD E. "Fundamentos da Termodinâmica Clássica". 3.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1993. 318p.

YAHIRO, A. et al. Development of Noferrous Cald Plate and Sheet by Warm Rolling with Different Temperature of Materials. ISIJ International, vol. 31 n. 6, 1991, p. 647-654.

8 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Construção de coletor solar de 1 m² de área externa e teste de campo para se obter a eficiência térmica, de acordo com as novas normas brasileiras, a saber:
 - a) ABNT NBR 15.747-1:2009 – Sistemas Solares Térmicos e seus Componentes – Coletores Solares (Parte 1 – Requisitos Gerais) e;
 - b) ABNT NBR 15.747-2: 2009 – Sistemas Solares Térmicos e seus Componentes – Coletores Solares (Parte 2 – Métodos de Ensaio).
 - c) análise de viabilidade econômica-financeira.
- Testar opção de desoxidação via química e verificar se haverá vantagens frente a desoxidação mecânica, usada neste trabalho.
- Colaminação em tiras de alumínio:
 - a) definir parâmetros de colaminação em tiras de alumínio;
 - b) fabricar trocadores de calor para outros fluidos conforme protótipos das figuras 8.1 e 8.2 e;
 - c) realizar testes térmicos para esses trocadores.



Fig 8.1: Tubo aletado em alumínio.



Fig 8.2: Trocador de calor em alumínio.

9 – ANEXOS

ANEXO I - PLACA ALETADA PARA TROCADOR DE CALOR, A PARTIR DE CHAPAS METÁLICAS, UNIDAS EM FASE SÓLIDA POR COLAMINAÇÃO OU POR OUTROS PROCESSOS DE COMPRESSÃO;

ANEXO II – WINGLET PLATE FOR HEAT EXCHANGER BUILT ON METAL, BONDED IN SOLID PHASE BY COLAMINATION OR OTHER COMPRESSION PROCESS.

ANEXO I - PLACA ALETADA PARA TROCADOR DE CALOR, A PARTIR DE CHAPAS METÁLICAS, UNIDAS EM FASE SÓLIDA POR COLAMINAÇÃO OU POR OUTROS PROCESSOS DE COMPRESSÃO:



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) (21) **PI 0602254-5 A**

(22) Data de Depósito: 26/05/2006
(43) Data de Publicação: 22/01/2008
(RPI 1933)



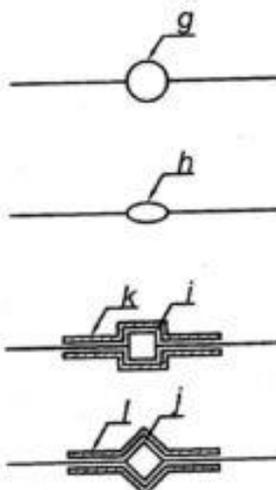
(51) *Int. Cl.:*
F28D 1/047 (2008.01)
F28D 1/03 (2008.01)
F28D 1/053 (2008.01)

(54) Título: **PLACA ALETADA PARA TROCADOR DE CALOR, A PARTIR DE CHAPAS METÁLICAS, UNIDAS EM FASE SÓLIDA POR COLAMINAÇÃO OU POR OUTROS PROCESSOS DE COMPRESSÃO**

(71) Depositante(s): Universidade Federal de Minas Gerais (BR/MG)

(72) Inventor(es): Estevevsson Ferreira Miqueletti, José Maria Ramón Caccioppoli, Elizath Marques Duarte Pereira

(57) Resumo: PLACA ALETADA PARA TROCADOR DE CALOR, A PARTIR DE CHAPAS METÁLICAS, UNIDAS EM FASE SÓLIDA POR COLAMINAÇÃO OU POR OUTROS PROCESSOS DE COMPRESSÃO. Placa aletada para trocador de calor, a partir de chapas metálicas, unidas em fase sólida por colaminação ou por outros processos de compressão, conjuga as funções de laminação e união através da colaminação, que é um processo de conformação mecânica em que ocorre a laminação e ao mesmo tempo a soldagem, ou seja, a união em fase sólida de metais através dos cilindros de laminação. Este processo tem por objetivo obter uma só peça, proporcionando um aumento da transferência de calor. Uma alta produção aliada a um rendimento máximo das chapas processadas, uma vez que na laminação pode se chegar a comprimentos finais muito maiores que os iniciais. A dita placa (figura 4, "p", "q" ou "r") é constituída inicialmente por duas chapas (figura 1, 1.a, "a" e "b"), tratadas termicamente e sobrepostas uma sobre a outra contendo uma "máscara" (figura 1.1.c, "c") entre elas "sanduiche" e depois disto este conjunto é conformado (figura 1, 1.d), após esta conformação mecânica é fixado um bico (figura 1, 1.e, "f") na região demonstrada na figura 1, 1.e, "c" e injetado pressão hidráulica ou pneumática (óleo, água ou ar) que geram as paredes dos dutos conforme modelos (figura 2, "g", "h", "i" e "j"), bem como outros modelos. Estas placas podem ser feitas de chapas metálicas iguais ou distintas.



PLACA ALETADA PARA TROCADOR DE CALOR, A PARTIR DE CHAPAS METÁLICAS, UNIDAS EM FASE SÓLIDA POR COLAMINAÇÃO OU POR OUTROS PROCESSOS DE COMPRESSÃO.

CAMPO DE INVENÇÃO

- 5 O presente pedido de patente refere-se a um processo de confecção de uma placa aletada para trocador de calor, a partir de chapas metálicas, unidas em fase sólida por colaminação ou por outros processos de compressão. Os trocadores de calor têm como componentes básicos os dutos e as aletas e são empregados na fabricação de placa absorvedora para coletores de energia solar, reatores nucleares, evaporadores de geladeiras, radiadores de automóveis e aeroplanos, condensadores para refrigeração e em muitas outras
- 10 aplicações. Os trocadores de calor têm como função transferir calor de um fluido de maior temperatura para um outro de menor temperatura, aquecendo, resfriando ou vaporizando os fluidos tais como a água, ar, amônia, diclorodifluormetano (freon-12). Entende-se por duto, um tubo que tenha seção transversal: quadrada, oval, redonda, etc. Quando são utilizadas aletas nos dutos obtêm-se um sensível aumento na troca de calor e do rendimento térmico dos trocadores de calor, já que há um aumento na área de transferência de calor.

20 ESTADO DA TÉCNICA

- Os trocadores de calor são compostos de duas peças: os dutos e as aletas. As aletas são formadas por tiras metálicas retangulares ou por discos circulares, em ambos os casos fixados nas paredes dos tubos. Entretanto para que ocorra a transferência de calor existe a necessidade de um firme contato
- 25 térmico/mecânico entre os dutos e as aletas, que atualmente é obtido por meio de soldagem ou prensagem. Entretanto, estes processos geram mecanismos de união que diminuem a transferência de calor e, conseqüentemente, o rendimento térmico, uma vez que se cria uma resistência térmica entre os dutos e as aletas. Além disto, na maioria das vezes, a solda não é contínua,
- 30 aumentando ainda mais a resistência térmica. A prensagem ainda é

termicamente menos eficiente, pois não se consegue um contato direto entre os dutos e as aletas. Nos processos de soldagem e prensagem, os dutos e as aletas, são feitos geralmente de maneira artesanal e conseqüentemente, de baixa produtividade, como por exemplo: as placas absorvedoras para coletores solares, que é feita de uma grade de tubos de cobre soldada e fixada a uma chapa (aleta) de cobre ou alumínio nesta grade de tubo; uma melhoria para placas para coletores foi proposta no pedido de patente brasileiro PI 9805493-2A, de dutos em forma de bainha fabricados por prensagem, porém requer a soldagem das aletas nos dutos. Há também uma proposta semelhante do pedido de patente americano US 4.249.519 onde duas chapas são sobrepostas e por um processo de soldagem de baixo calor são prensadas, contudo o processo de soldagem requer preparo das chapas. Uma outra patente americana US 4.074.406 propôs também por meio de prensagem tubos de cobre sobre uma chapa, todavia isto gera resistência térmica entre o tubo e a chapa, outra patente americana US 4.023.557 propôs uma placa absorvedora com uma tubulação interna de cobre e externa de alumínio soldada em uma chapa de alumínio, porém ocorre o aumento ainda maior da resistência térmica. Há também dutos aletados, proposto no pedido de patente brasileiro PI 9803049-3A, construídos a partir de um tubo de diâmetro maior que, por operações de prensagem, dobram-se parte das paredes, obtendo-se um duto de diâmetro menor com aletas laterais, não obstante, este duto aletado torna-se limitado em relação ao comprimento, devido à necessidade de maiores equipamentos para a conformação mecânica dos mesmos. Uma nova forma para uma placa absorvedora proposta no pedido de patente americano US 4.911.353 é de se obter uma superfície seletiva pulverizando metal fundido sobre uma tubulação, mas o processo de produção é requer controle de temperatura do metal fundido e também gera resistência térmica entre o metal fundido e a tubulação.

DESCRIÇÃO DA INVENÇÃO

No intuito de solucionar tais inconvenientes, a presente patente propõe a confecção de uma placa aletada para trocador de calor, a partir de chapas metálicas, unidas em fase sólida por colaminação ou por outros processos de compressão. A colaminação é um processo de conformação mecânica em que

5 ocorre a laminação e ao mesmo tempo a soldagem, ou seja, a união em fase sólida de metais através dos cilindros de laminação. Na laminação de chapas há uma redução da espessura e conseqüentemente um aumento do comprimento. E a união em fase sólida é resultante das condições superficiais

10 de ambas chapas, do nível de deformações plásticas dos metais e das tensões de compressão. Para isto é necessário submeter os metais a um processo de conformação mecânica que gere tensões de compressão, por exemplo, compressão em estado plano, laminação, etc. Estas tensões de compressão

15 ocorrem na região entre os dois cilindros de laminação que é também chamada de arco de contato. Desta forma, quando duas chapas, previamente preparadas, são sobrepostas e entram na região do arco de contato surgem tensões de compressão ocorrendo a deformação plástica de ambas as chapas e a esta deformação segundo alguns pesquisadores ocorre a união entre elas, sendo também chamada união em fase sólida. A união em fase sólida é uma

20 soldagem permanente de metais iguais ou distintos, realizada em temperaturas tais que não ocorram à fusão dos metais. A explicação mais aceita atualmente é que, para se ter a união em fase sólida é necessário haver ligação metálica entre as superfícies a serem unidas. Para isto é essencial uma deformação crítica, que é a deformação plástica mínima necessária para promover a união permanente de um par metálico. A medida em que o par metálico (chapas)

25 adentra na região do arco de contato há um aumento da pressão aplicada e a deformação plástica produz uma expansão da superfície, surgindo áreas de metal "virgem" promovendo a ligação metálica entre as superfícies do par metálico. E assim, a colaminação cria como resultado uma única peça e, precisamente por isto, haverá um significativo aumento da transferência de

30 calor e do seu rendimento térmico, eliminando a necessidade de soldagem convencional ou do contato por prensagem, diminuindo os custos. É um processo de fabricação de alta produtividade, principalmente quando obtido por

colaminação. Além disto, não há maiores limitações no que se refere ao comprimento da placa (chapa), uma vez que no processo de colaminação, por ser do tipo "contínuo", o comprimento final depende somente do comprimento inicial e não do equipamento, devido a esta vantagem pode-se confeccionar

5 uma placa aletada para qualquer dimensão, tanto para o seu comprimento e largura e também para qualquer diâmetro do duto, seja para um único duto ou múltiplos dutos. Desta forma conseguiu-se através de duas chapas obter um

10 duto aletado ou uma placa aletada com vários dutos que podem ser utilizados para coletores solares ou para trocadores ou dissipadores de calor para outros equipamentos.

A placa aletada, em metal, para trocadores de calor, poderá ser mais bem compreendida pelas figuras em anexo, onde:

A **FIGURA 1**, de 1.a a 1.e, representa o processo de confecção de uma placa aletada.

15 A **FIGURA 2** mostra tipos de dutos.

A **FIGURA 3** mostra os tipos de máscaras.

A **FIGURA 4** mostra os tipos de trocadores

Com referência a estas figuras, o processo de confecção de uma placa aletada é mostrado na figura 1, de 1.a a 1.e. Inicialmente, duas chapas metálicas

20 (figura 1, 1.a, "a" e "b") recebem um tratamento térmico de recozimento visando a retirada das tensões internas o que facilita as deformações impostas pelos cilindros de laminação (figura 1, 1.d, "e"), após isto, é retirada a camada de óxido de um lado da superfície de cada chapa com uma escova rotativa (figura 1, 1.a, "d"), esta retirada de óxido também pode ser feita por outros processos,

25 como por exemplo: uma decapagem química. Depois da retirada do óxido é colocada uma "máscara" (figura 1, 1.b, "c") (exemplo, um papel desumidificado) sobre a chapa (figura 1, 1.b, "a"), e logo em seguida sobrepõe uma sobre a outra (figura 1, 1.c, "a" e "b"). O conjunto obtido na figura 1, 1.c é então submetido a um processo de conformação mecânica chamada de colaminação

30 mostrado na figura 1, 1.d, ou seja, uma laminação de chapas e ao mesmo

tempo a união em fase sólida de ambas as chapas através dos cilindros (figura 1, 1.d, "e"), salvo na região coberta ou protegida pela "máscara" (figura 1, 1.b, "c"), que gerarão as paredes do duto. No caso específico de laminação, pode-se submeter o conjunto obtido na figura 1, 1.d, "a", "b" e "c" a vários passes (de

5 laminação) até se obter o comprimento desejado. Ao término da colaminação do conjunto obtido na figura 1, 1.d, "a", "b" e "c" torna-se agora uma só peça. Na região protegida pela "máscara" (figura 1, 1.e, "c") é fixado um bico (figura 1, 1.e, "f"), e através deste é injetado pressão hidráulica de óleo, água, ou ar que gerarão as paredes dos dutos. Na **figura 2** mostra os tipos de dutos:

10 redondo (figura 2, "g"); oval (figura 2, "h"); quadrado (figura 2, "i"); losango (figura 2, "j"), ou outras formas conforme a necessidade. Para outras formas é necessária a colocação de matrizes (figura 2, "k"), (figura 2, "l") ou dependendo da forma que desejar o perfil do duto. O diâmetro do duto é diretamente

15 proporcional à largura da "máscara" (figura 1, 1.b, "c₁"). Em relação ao duto redondo (figura 2, "g"), o seu diâmetro é dado pela largura demonstrada na figura 1, 1.b, "c₁", e injetando uma pressão hidráulica ou pneumática até que se tenha toda parede expandida. Já no duto oval (figura 2, "h"), o seu diâmetro menor pode ser controlado pela pressão injetada até uma dimensão desejada.

20 As máscaras mostradas na **figura 3** sobre a chapa podem ser feitas de várias formas (figura 3, "m", "n" e "o") ou outros modelos. Com o duto aletado ou a placa aletada pode se construir trocadores de calor de diferentes maneiras, conforme apresentado na **figura 4**: em paralelo (figura 4, "p") que pode ser utilizado para radiadores; ou em um mesmo plano, ideal para coletores solares, que pode ser confeccionado por vários dutos aletado (figura 4, "q") ou uma

25 placa aletada (figura 4, "r"). Os materiais mais usuais são cobre e alumínio, por serem economicamente viáveis, porém pode ser produzida placa aletada de outros metais segundo as necessidades técnicas e até mesmo de metais distintos.

REIVINDICAÇÕES

- 1 - PLACA ALETADA PARA TROCADOR DE CALOR, A PARTIR DE CHAPAS METÁLICAS, UNIDAS EM FASE SÓLIDA POR COLAMINAÇÃO OU POR OUTROS PROCESSOS DE COMPRESSÃO **caracterizada por** constituir-se de duas chapas metálicas (Figura 1.a - a e b) iguais ou distintas e uma máscara (Figura 1b - c) entre elas, que submetidas a um processo de conformação mecânica por colaminação ou compressão, em que são unidas em fase sólida e posteriormente através de injeção de água, óleo ou ar na região da máscara (Figura 1b - c) se dá a formação de um duto, não limitante.
- 5
- 10 2 - PLACA ALETADA PARA TROCADOR DE CALOR, A PARTIR DE CHAPAS METÁLICAS, UNIDAS EM FASE SÓLIDA POR COLAMINAÇÃO OU POR OUTROS PROCESSOS DE COMPRESSÃO, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizada por** funcionar como trocador de calor, não limitante.
- 15 3 - PLACA ALETADA PARA TROCADOR DE CALOR, A PARTIR DE CHAPAS METÁLICAS, UNIDAS EM FASE SÓLIDA POR COLAMINAÇÃO OU POR OUTROS PROCESSOS DE COMPRESSÃO, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado por** funcionar como coletor solar, não limitante.

P10602354

Figura 1

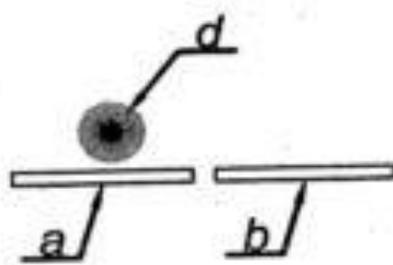


FIG. 1.a

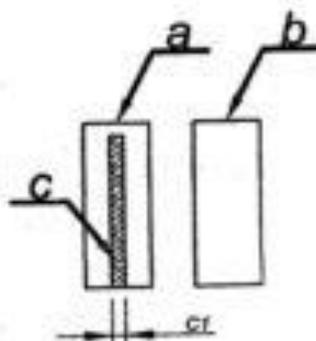


FIG. 1.b

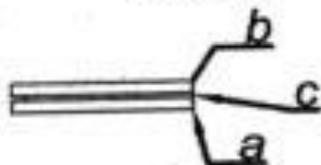


FIG. 1.c

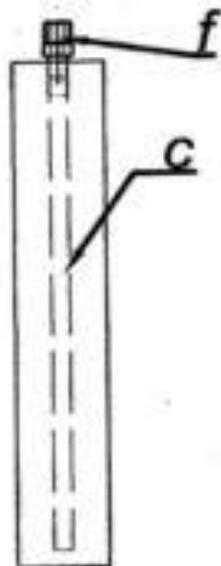


FIG. 1.e

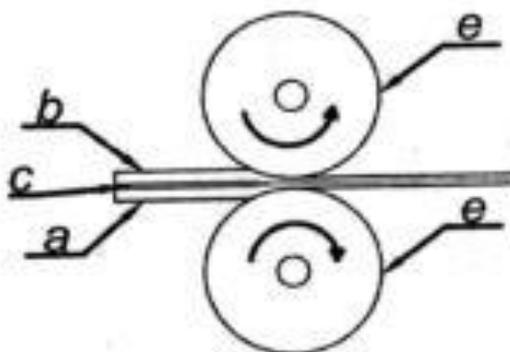


FIG. 1.d

P1060254

2/4

Figura 2

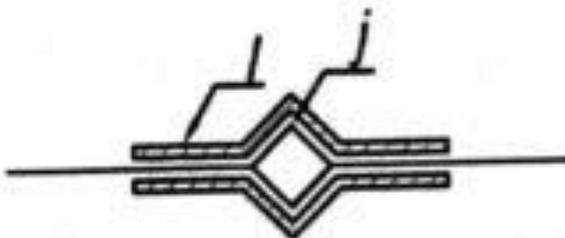
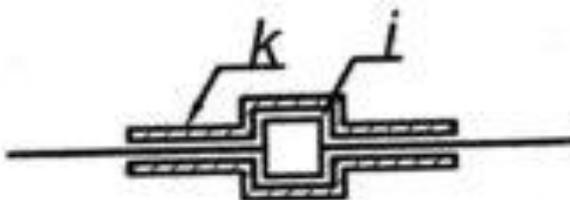
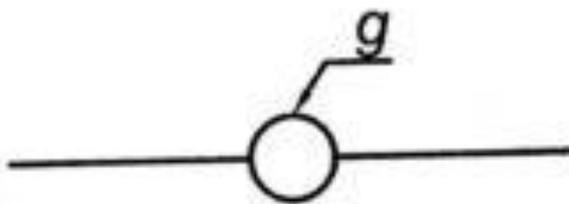
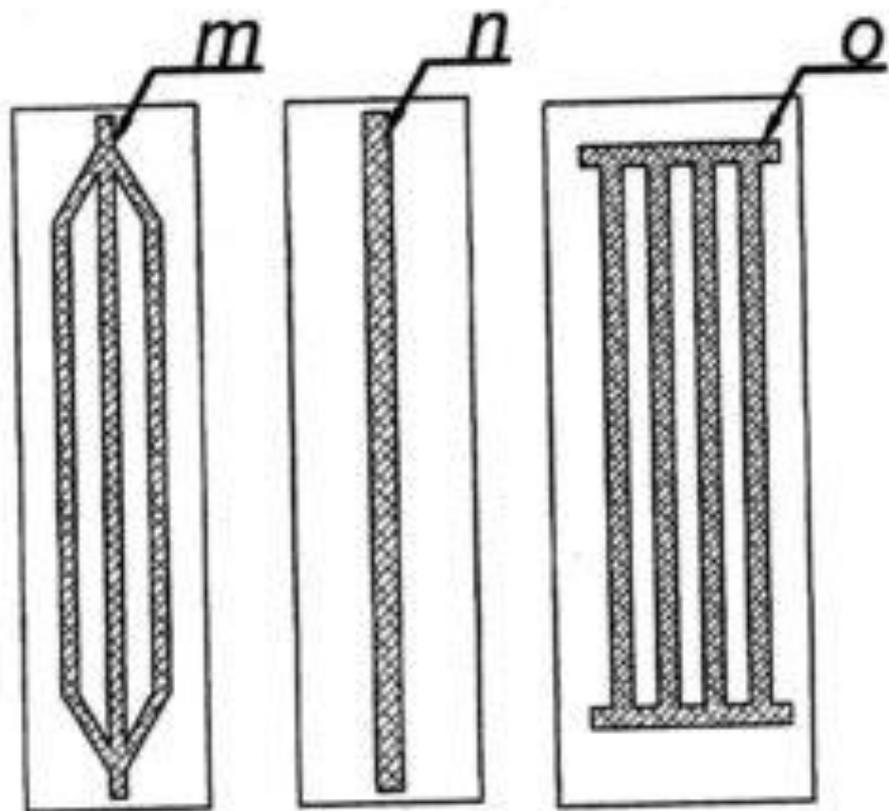


FIG. 254

3/4

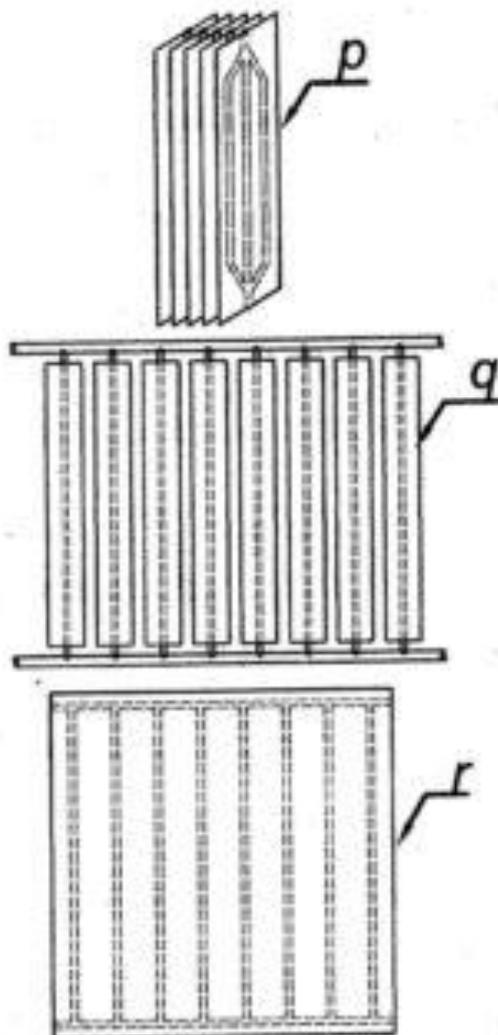
Figura 3



PID60254

4/4

Figura 4



RESUMO

5 "PLACA ALETADA PARA TROCADOR DE CALOR, A PARTIR DE CHAPAS METÁLICAS, UNIDAS EM FASE SÓLIDA POR COLAMINAÇÃO OU POR OUTROS PROCESSOS DE COMPRESSÃO"

Placa aletada para trocador de calor, a partir de chapas metálicas, unidas em fase sólida por colaminação ou por outros processos de compressão, conjuga as funções de laminação e união através da colaminação, que é um processo de conformação mecânica em que ocorre a laminação e ao mesmo tempo a soldagem, ou seja, a união em fase sólida de metais
10 através dos cilindros de laminação. Este processo tem por objetivo obter uma só peça, proporcionando um aumento da transferência de calor. Uma alta produção aliada a um rendimento máximo das chapas processadas, uma vez que na laminação pode se chegar a comprimentos finais muito maiores que os iniciais.
15

A dita placa (figura 4, "p", "q" ou "r") é constituída inicialmente por duas chapas (figura 1, 1.a, "a" e "b"), tratadas termicamente e sobrepostas uma sobre a outra contendo uma "máscara" (figura 1, 1.c, "c") entre elas "sanduíche" e depois disto este conjunto é conformado (figura 1, 1.d),
20 após esta conformação mecânica é fixado um bico (figura 1, 1.e, "f") na região demonstrada na figura 1, 1.e, "c" e injetado pressão hidráulica ou pneumática (óleo, água ou ar) que geraram as paredes dos dutos conforme modelos (figura 2, "g", "h", "i" e "j"), bem como outros modelos. Estas placas podem ser feitas de chapas metálicas iguais ou distintas.

ANEXO II – WINGLET PLATE FOR HEAT EXCHANGER BUILT ON METAL, BONDED IN SOLID PHASE BY COLAMINATION OR OTHER COMPRESSION PROCESS.

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau



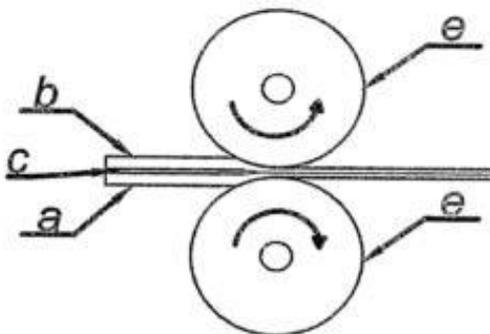
(43) International Publication Date
10 January 2008 (10.01.2008)

PCT

(10) International Publication Number
WO 2008/003151 A1

- (51) International Patent Classification:
F28F 3/14 (2006.01) B23P 19/00 (2006.01)
- (21) International Application Number:
PCT/BR2007/000161
- (22) International Filing Date: 25 May 2007 (25.05.2007)
- (25) Filing Language: English
- (26) Publication Language: English
- (30) Priority Data:
PI0602254-5 26 May 2006 (26.05.2006) BR
- (71) Applicant: UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG [BR/BR]; Avenida Antônio Carlos 6627, Reitoria, CTTT - 7º andar, PAMPULHA, 31270-901 Belo Horizonte - MG (BR).
- (72) Inventors: CACCIOPPOLI, Jose Maria Ramon; Rua Consul Robert Levy, 1205/201, Bairro Sao Bento, Belo Horizonte-MG (BR). DUARTE, Elizabeth Pereira; Rua Dep. Manuel Costa, 90, Bairro Santa Lucia, Belo Horizonte-MG (BR). FERREIRA, Estevesom; Rua Brasília, 825, Bairro Sao José, Belo Horizonte-MG, Brazil (BR).
- (74) Agent: DE MOURA Adriana Claudia; Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Avenida Antonio Carlos, 6627-Reitoria-CTTT-7ºANDAR, Pampulha - Belo Horizonte - Minas Gerais, CEP. 31270-901 (BR).
- (81) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of national protection available): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of regional protection available): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Published:
— with international search report
— before the expiration of the time limit for amending the claims and to be republished in the event of receipt of amendments
- For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: WINGLET PLATE FOR HEAT EXCHANGER BUILT ON METAL BONDED IN SOLID PHASE BY COLAMINATION



(57) Abstract: A winglet plate for heat exchangers made of metal sheets (a, b) bonded in solid phase by colamination or other compressive processes, combining lamination functions and bonding through colamination, a process of mechanical shaping in which lamination and soldering occur simultaneously, that is, the bonding in solid phase of metals by means of lamination cylinders (e). The aim of this process is to obtain a sole piece of metal by attaining an increased heat transfer. In other words, a high production together with an utmost yield of processed sheets as lamination can reach greater ultimate dimensions as compared to the initial ones.

WO 2008/003151 A1

TITLE OF THE INVENTION

WINGLET PLATE FOR HEAT EXCHANGER BUILT ON METAL PLATES BONDED IN SOLID PHASE BY COLAMINATION OR OTHER COMPRESSION PROCESSES.

FIELD OF THE INVENTION

[001] This patent request concerns a construction of a winglet plate for heat exchangers using metal sheets bonded in solid phase by colamination or other compression processes. The basic members of aforesaid heat exchangers are tubes and winglets used in manufacturing absorber plates for solar collectors, nuclear reactors, refrigerator evaporators, automobile and airplane radiators, refrigeration condensers and several other applications. Said heat exchangers are used for transferring heat from a higher temperature fluid to another with a lower temperature, by heating, cooling or vaporizing fluids, such as water, air, ammonia, dichlorodifluoromethane (freon-12). Tube is understood here as a cross section tube: square, oval, round, etc. A significant increase in heat exchange and thermal yield is observed when using said tubes with winglets as an increase in transfer area is ensured.

BACKGROUND OF THE INVENTION

[002] Such heat exchangers are comprised of two parts: tubes and winglets. Said winglets are comprised of rectangular metal strips or circular disks and fixed onto tube walls in both cases. However, a firm thermal/mechanic contact between tubes and winglets is required for heat transfer, which is currently obtained by soldering or pressing. Nevertheless, such processes create bonding mechanisms that reduce heat transfer and hence thermal yield as thermal resistance is brought about between tubes and winglets. Moreover, soldering is mostly discontinued, which further increases thermal resistance. Pressing is even less efficient as it produces no direct contact between tubes and winglets. Tubes and winglets produced by means of soldering or pressing are usually

made in an artisanal manner thus at low productivity rates, such as: absorber plates for solar collectors, which are made of a soldered copper tube grate and fixed onto a copper or aluminum sheet (winglet); an improvement in collector plates has been proposed by the Brazilian patent request PI 9806493-2A, which concerns sheath-shaped tubes made by pressing that require soldering tubes and winglets though.

[003] A similar proposal has been made by the American patent request US 4.249.519 through which two sheets are overlaid and pressed by a low heat soldering, the latter, however, requiring preparation of said sheets. Another American patent – US 4.074.406 – has proposed pressed copper tubes placed onto a sheet, which however causes thermal resistance between tubes and sheet; another American patent numbered US 4.023.557 has proposed an absorber plate with an internal copper tubulation and an outer aluminum tubulation, which however cause an even higher thermal resistance. Winglet tubes have also been proposed by the Brazilian patent request PI 9803049-3A that were constructed with tubes having a larger diameter, which through pressing operations had their walls partly folded resulting in smaller diameter tubes with lateral winglets. Nevertheless, the making of such a kind of winglet tubes is impaired as far as their length is concerned, due to the need of adequate equipment for their mechanical shaping. Another shape for an absorber plate was proposed by the American patent request US 4.911.353, through which a selective surface would be obtained by pulverizing cast metal onto tubulation, but this process requires temperature control of cast metal, which also causes thermal resistance between cast metal and tubulation.

INVENTION DESCRIPTION

[004] With a view to solve such inconveniences, this patent request proposes a winglet plate for a heat exchanger using metal sheets bonded in solid phase by colamination or other compression processes.

[005] Colamination is a mechanic shaping process in which lamination occurs simultaneously with soldering, i.e., metal bonding in solid phase by means of

laminating cylinders. Reduced thickness occurs in sheet lamination that provokes an increase in length. And solid phase bonding results from the surface conditions of both sheets, level of plastic deformation of metals and compressive stress.

[005] For this, metals must be submitted to a mechanical shaping that causes compressive stresses, as for example, plane state compression, lamination, etc. Such compressive stresses happen in the area between the two lamination cylinders, an area also called contact arch. In this way, when two previously prepared sheets overlay and enter the contact arch area, compressive stresses arise that provoke plastic deformation of both sheets and – according to some researchers – bonding occurs between said sheets, which is also called solid-phase bonding. The latter is a permanent metal soldering of similar or different metals achieved in temperatures that prevent melting of said metals.

[006] Nowadays, an explanation mostly accepted for this is that metallic connection is needed between surfaces to be bonded. For this, critical deformation is essential, which is a minimum plastic deformation necessary for a permanent bonding of a metallic pair. To the extent that a metallic pair (sheets) enters the contact arch area, applied pressures rise and plastic deformation produces a surface expansion then provoking virgin metal areas to appear that promote metal bonding between the surfaces of the aforesaid metallic pair. Therefore, colamination results in a sole piece and, precisely for this reason, a significant increase in heat transfer and its thermal yield will occur that conventional soldering or contact by pressing are rendered unnecessary, in this way with reduced costs.

[007] This process is a high productivity fabrication mainly if obtained through colamination. Additionally, there are no significant restrictions as to plate (sheet) length, since the ultimate length of material is only dependent on the initial length of said material and not on equipment as colamination is a continuous-typed process. Due to such an advantage, a winglet plate can be fabricated in both dimensions – length and breadth – and any tube diameter for a sole tube or multiple tubes. A winglet plate with several tubes is obtained in this way,

which may be used for solar collectors or heat exchangers or dissipaters or other equipment.

BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

[008] A metal winglet plate can be better understood in the attached figures, as follows:

[009] **FIGURE 1**, from **1.a** to **1.e**, represents the winglet plate making.

[010] **FIGURE 2** shows different kinds of tubes.

[011] **FIGURE 3** shows different kinds of masks.

[012] **FIGURE 4** shows different kinds of exchangers.

EXAMPLES

[013] As for such figures, the making of a winglet plate in figure 1 – from 1.a to 1.e. Initially, two metal sheets (figure 1, 1.a, "a" and "b") are given a baking thermal treatment viewing removal of internal stress that eases deformation imposed by lamination cylinders (figure 1, 1.d, "e"). Afterwards, the oxidation layer is removed from one surface side with a rotary brush (figure 1, 1.a, "d"); such a procedure can also be accomplished through other processes, such as: chemical decapping.

[014] A "mask" is then placed after oxidation removal (figure 1, 1.b, "c") (e.g., a dehumidified piece of paper) onto a sheet (figure 1, 1.b, "a"); following this, another sheet is overlaid (figure 1, 1.c, "a" and "b"). The set obtained in figure 1, 1.c is then submitted to a mechanical shaping called colamination shown in figure 1, 1.d, i.e., a sheet lamination simultaneously carried out with a solid phase bonding through cylinders (figure 1, 1.d, "e"), except for the area covered or protected by the "mask" (figure 1, 1.b, "c"), which will create tube walls. In the specific case of lamination, the set obtained in figure 1, 1.d, "a", "b" and "c" can be submitted to several passes (of lamination) until a desired length is obtained.

[015] As colamination finishes, the set obtained in figure 1, 1.d, "a", "b" and "c" becomes now a sole piece of metal. A spigot (figure 1, 1.and, "f") is then fixed in

pressure injection of oil, water or air will create tube walls. **Figure 2** shows different kinds of tube forms: round (figure 2, "g"); oval (figure 2, "h"); square (figure 2, "i"); lozenge (figure 2, "j") or even of other forms if needed. As for other forms, placement of matrices is necessary (figure 2, "k"), (figure 2, "l"), depending on the desired form for the tube profile. The tube diameter is directly proportional to the "mask" breadth (figure 1, 1.b, "c₁"). The tube diameter (figure 2, "g") is given by the length shown in figure 1, 1.b, "c₁" through hydraulic or pneumatic pressure injection until the whole wall is expanded. As for oval tube (figure 2, "h"), however, its smaller diameter can be controlled by means of pressure injection until a desired dimension is obtained.

[016] The masks on sheet shown in **figure 3** can be made in various forms (figure 3, "m", "n" and "o") or other models. The aforesaid heat exchangers can be constructed with winglet tubes or winglet plates in different ways, as shown in **figure 4**: parallel to this (figure 4, "p"), these heat exchangers can be used for radiators or, at the same level, they are ideal for solar collectors that can comprise several winglet tubes (figure 4, "q") or a winglet plate (figure 4, "r"). Copper and aluminum are mostly used materials as they are economically feasible. However, other materials can also be used for the making of winglet plates even with different ones, according to technical necessities.

CLAIMS

What is claimed is:

- 1 – A wingle plate which is comprising by:
 - a) two metal plates, optionally distinct with a mask between it;
 - b) metal sheets bonded in solid phase by colamination;
 - c) constructed with metal materials;
 - d) metal materials mostly used as copper and aluminum;
- 2 – The wingle plate, in accordance with claim 1, which is **characterized by** acting as a nonlimiting heat exchanger.
- 3 - The wingle plate, which is **characterized by** a product used in the making of an absorber plate for solar energy collectors, nuclear reactors, refrigerator evaporators, automobile and airplane radiators, and cooling condensers.
- 4 - The wingle plate, in accordance with claim 2, **characterized by** several applications for heating, cooling, environment acclimatization, air conditioning – cooling and heating.
- 5 - The wingle plate, in accordance with claim 1, **characterized by** basic components for the said wingle plate, tubes and winglelets.
- 6 - The wingle plate, in accordance with claim 1, **characterized by** being optionally obtained by other compressive processes.
- 7 - The wingle plate, in accordance with claim 1, **characterized as** resulting from colamination of a sole piece of metal with significant heat transfer and thermal yield with no need for conventional soldering or contact by pressing.
- 8 – The process to obtain a wingle plate, in accordance with claims 1 and 7, **characterized by** promoting, in a first phase, a rebaking thermal treatment viewing to remove internal stress.

9 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claims 1 and 7 and 8, **characterized by** ultimate removal of an oxidation layer in one side of each plate surface with the use of a rotating brush.

10 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 10, **characterized by** oxidation removal optionally done by other processes, such as chemical decapping.

11 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claims 1 and 7, 8, 9 and 10, **characterized by** placement of a "mask" of dehumidified paper after oxidation removal.

12 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claims 1 and 7, 8, 9, 10 and 11 **characterized by** a set of two metal sheets by overlaying them one upon the other.

13 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claims 1 and 7, 8, 9, 10, 11 and 12, **characterized by** submitting the said set of sheets to a mechanical shaping called colamination.

14 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 13, **characterized by** the permanent bonding in solid phase of equal or distinct metals, accomplished in such temperatures so as not to allow melting of metals.

15 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 14, **characterized by** one sole piece of metal after completion of colamination.

16 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claims 1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 and 15, **characterized by** submitting, in the specific case of lamination, the aforesaid obtained set of sheets to several lamination phases until the desired length is achieved.

17 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claims 1, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 and 16, **characterized by** a fixed spigot placed in the area protected by the "mask" for hydraulic pressure injection of oil, water or air that will create tube walls.

- 18 - The process to obtain a winglet plate, **characterized by** a possible attainment of several tube kinds.
- 19 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 18, **characterized by** tubes of circular, square and triangular forms.
- 20 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 1, **characterized by** a winglet tube obtained from two metal sheets or a winglet plate comprised by several tubes.
- 21 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 1, **characterized by** the possible construction of heat exchangers by using winglet tubes or winglet plates.
- 22 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 1, **characterized by** producing radiators using parallel tubes.
- 23 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 1, **characterized by** a winglet plate constructed at an equal plane to be used for producing solar collectors.
- 24 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claims 1 and 23, **characterized by** a solar collector containing several winglet tubes or plates.
- 25 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 1, **characterized by** the need of placing matrices for attaining winglet plates with other shapes.
- 26 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 19, **characterized by** the tube's diameter being directly proportional to the "mask" breadth.
- 27 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 19, **characterized by** a smaller diameter of an oval tube to be controlled by injected pressure until a desired dimension is obtained.
- 28 - The process to obtain a winglet plate, in accordance with claim 1, **characterized by** ultimate length being dependent only on the initial length and not on equipment.

Figure 1

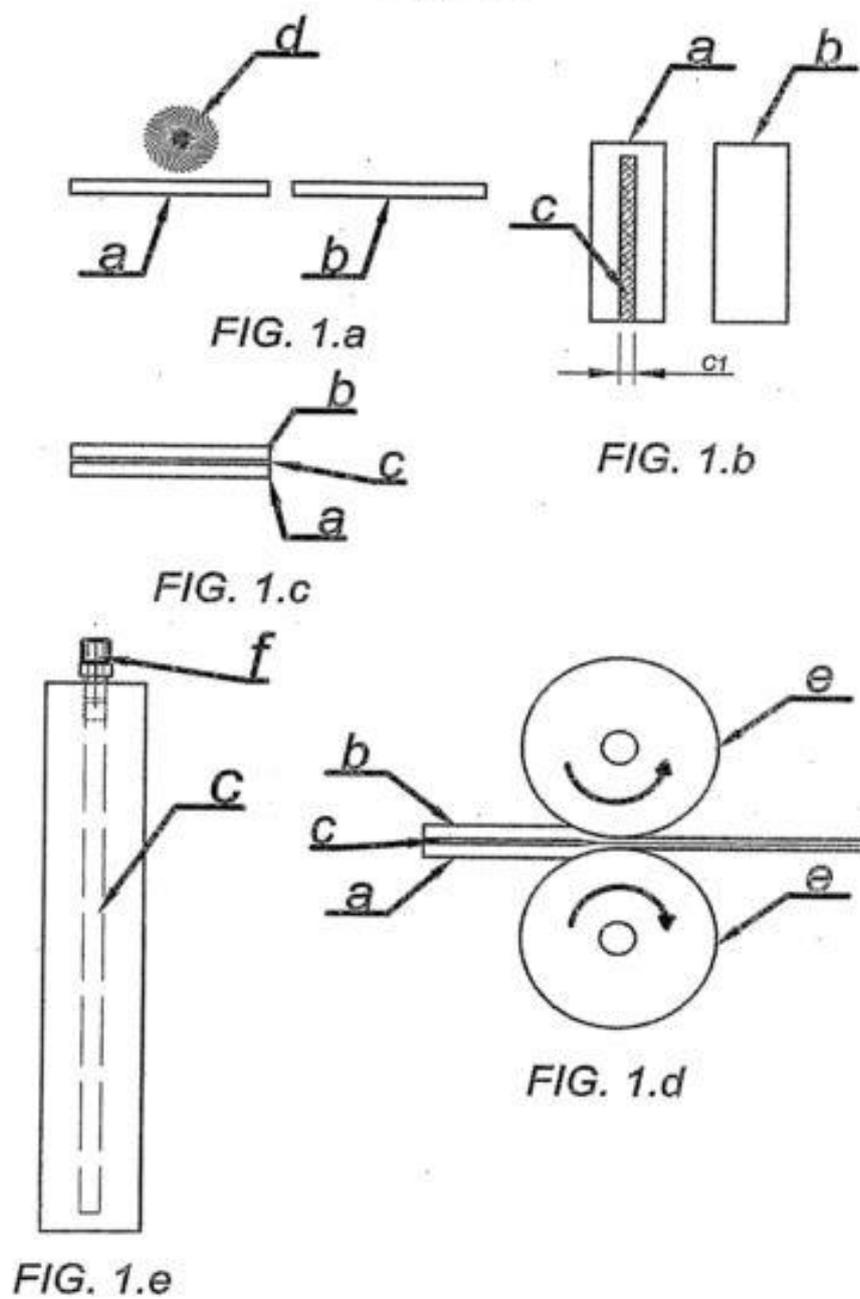


Figure 2

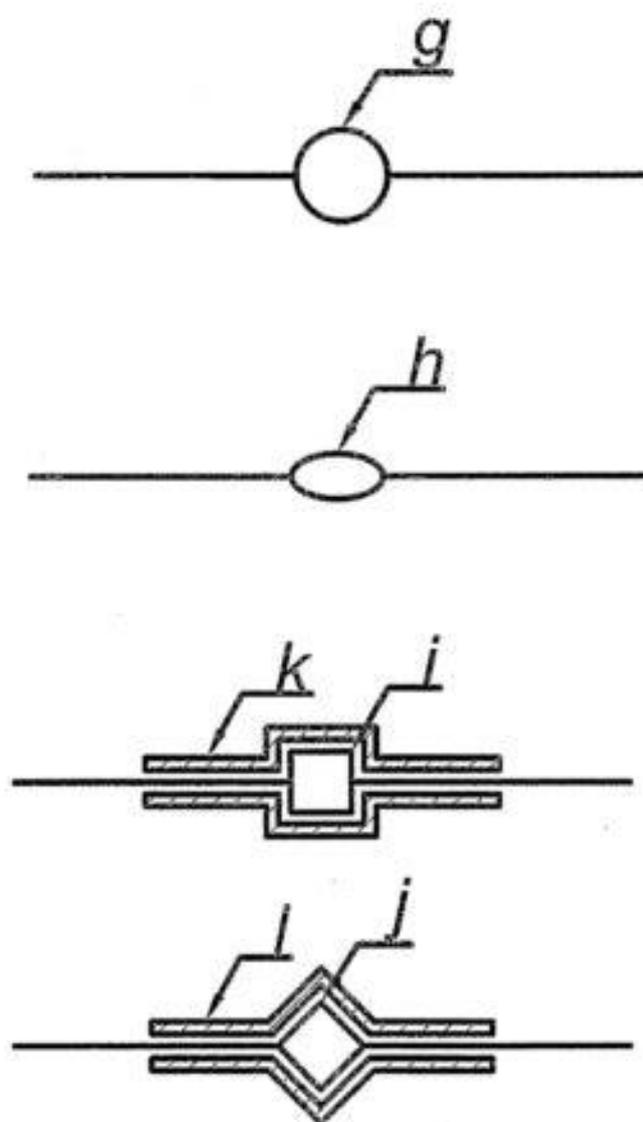


Figure 3

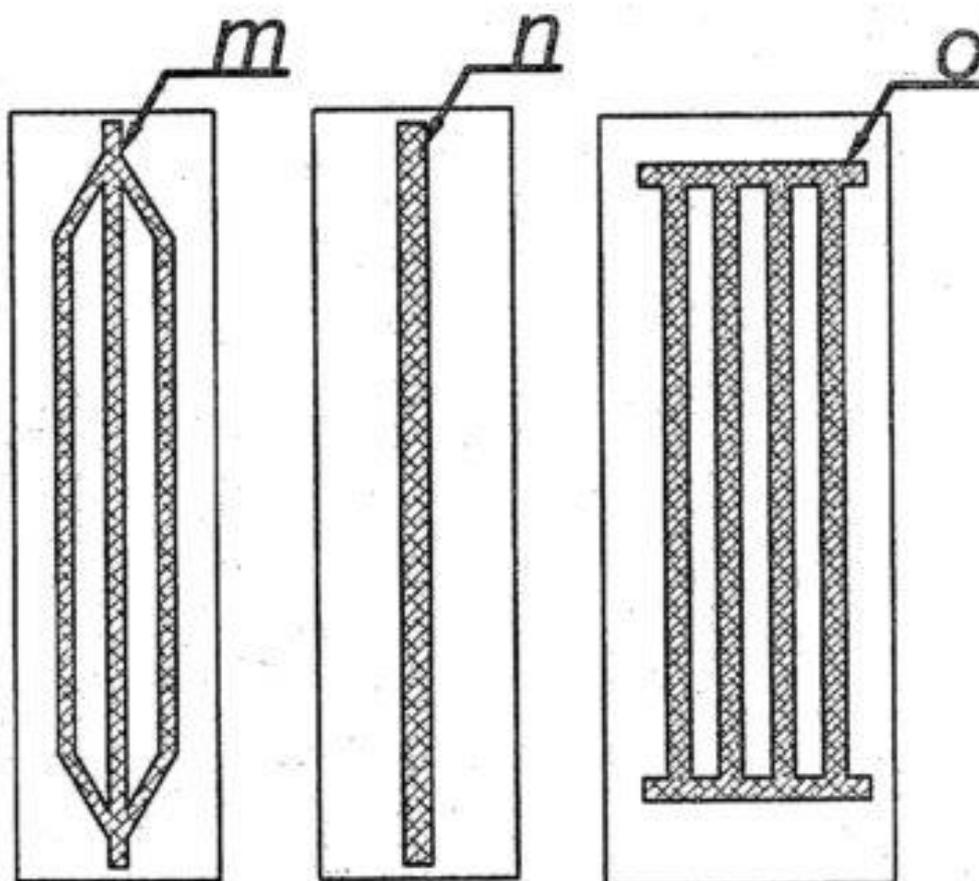
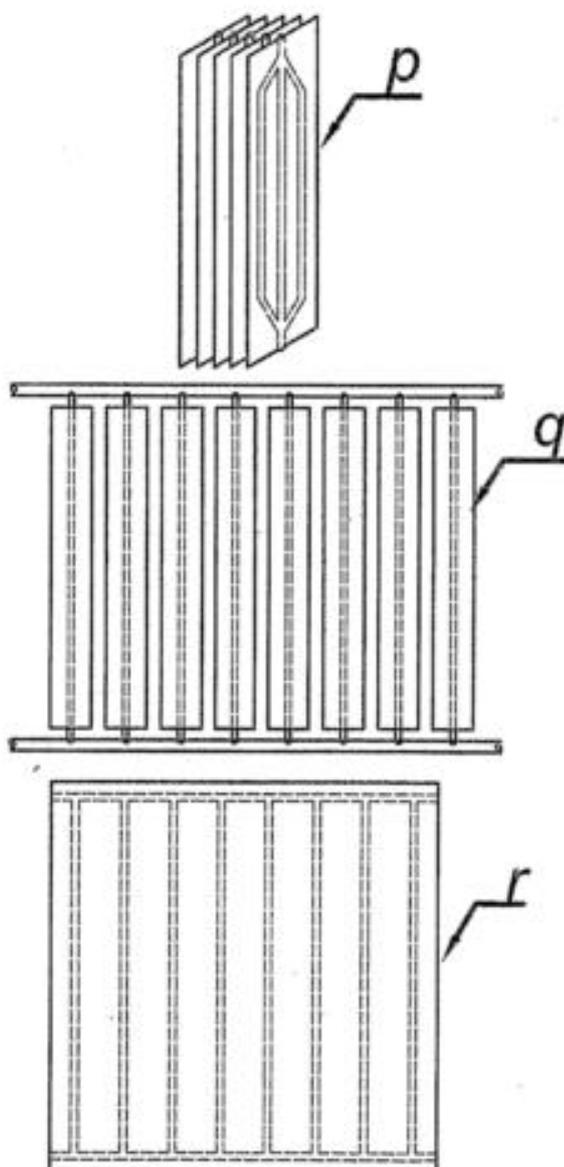


Figure 4



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/BR 2007/000161

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC ⁸ : F28F 3/14 (2006.01); B23P 19/00 (2006.01) According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC ⁸ : F28F, B23P, Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPODOC; WPI; Fulltext Databases;		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	GB 2 391 296 A (HYDROCLIMA LTD) 4 February 2004 (04.02.2004) <i>Fig. 1-4; page 7, line 3 - page 10, line 2;</i> --	1 - 5, 7
X	DE 197 56 487 A1 (KME SCHMOELE GMBH) 24 June 1999 (24.06.1999) <i>Fig. 1,2; column 1, line 3 - column 2, line 55;</i> --	1, 2
X	EP 0 703 427 A1 (SHOWA ALUMINUM CORPORATION) 27 March 1996 (27.03.1996) <i>Fig. 1,2; column 3, line 6 - 58; claim 1;</i> ---	1, 2
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family
Date of the actual completion of the international search 9 November 2007 (09.11.2007)		Date of mailing of the international search report 27 November 2007 (27.11.2007)
Name and mailing address of the ISA/ AT Austrian Patent Office Dresdner Straße 87, A-1200 Vienna Facsimile No. +43 / 1 / 534 24 / 535		Authorized officer HUBER J. Telephone No. +43 / 1 / 534 24 / 313

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family membersInternational application No.
PCT/BR 2007/000161

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
GB A 2391296		GB A 2391296	2004-02-04
DE A 19756487		DE A1 19756487	1999-06-24
EP A 0703427		EP A1 0703427	1996-03-27
		DE T2 69419754T	2000-02-10
		DE D1 69419754D	1999-09-02
		AT T 182673T	1999-08-15