

# ESTAMPAGEM INCREMENTAL NA FABRICAÇÃO DE COLETORES SOLARES PLANOS<sup>1</sup>

Rodrigo Patrício de Arruda<sup>2</sup>

Roger Navarro Verástegui<sup>3</sup>

Luis Fernando Folle<sup>4</sup>

Lirio Schaeffer<sup>5</sup>

## Resumo

Considerando a atual demanda energética, esta pesquisa busca alternativas para fabricação de coletores solares planos aplicando técnicas inovadoras em conformação de chapas. O objetivo é desenvolver um processo de fabricação flexível para placa absorvedora, empregando a Estampagem Incremental. Esta utiliza uma matriz de suporte em PU e um prensa-chapas, aplicada com auxílio de uma máquina CNC. A Ferramenta utilizada consiste um punção de ponta esférica de fácil fabricação que "desenha" o canal de passagem da água diretamente na chapa, promovendo uma deformação pontual e progressiva. Para compor o canal utilizou-se a técnica de solda por atrito (Friction Stir Welding) com uma ferramenta simples que aproveita o mesmo ferramental da estampagem incremental em um "set-up" rápido da CNC. Foram utilizadas chapas de alumínio de 1mm de espessura. O novo coletor deve apresentar uma eficiência aprimorada em comparação aos fabricados pelo método tradicional, com uma geometria que favoreça a área de contato com a água. Este processo permite uma fantástica flexibilização, viabilizando a produção de pequenos lotes e tornando possível produzir uma enorme variedade de produtos e componentes de geometrias complexas a partir de um ferramental simples e tempos de "set-up" reduzidos. Publicados aqui estão os fundamentos, discussões e conclusões desta pesquisa.

**Palavras-chave:** Coletor solar; Estampagem incremental; Chapas metálicas.

## INCREMENTAL FORMING IN THE FABRICATION OF SOLAR ENERGY COLLECTOR PANELS

### Abstract

Considering the actual power demand, this research looks for alternatives to the fabrication of solar energy collector panels, using new technologies in sheet metal forming. The objective is to develop a flexible fabrication process for the absorber sheet, using Incremental Forming. It consists in a PU support die and a blank holder, applied with the aid of a CNC machine. The tool consists in a spherical edge punch of easy fabrication that "draws" the water channel directly into the sheet, promoting a punctual and progressive deformation. To compose the channel, it was used the Friction Stir Welding technique, with a simple tool that uses the same tooling of the Incremental Forming in a quick setup of the CNC. Were used Aluminium sheets of 1mm tick. The new collector panel should have a improved efficiency if compared to the traditionally made, and with a geometry that benefits the contact area with the water. This process allows an fantastic flexibilization, making the low volume production feasible, allowing the production of a great variety of products and components with complex geometries from simple tooling and reduced setup times. Here are published the fundamentals, discussions and conclusions related to this research.

**Key words:** Solar energy collector panels; Incremental forming; Sheet metal.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

<sup>2</sup> *Pesquisador e aluno de doutorado do LdTM, bolsista CNPq*

<sup>3</sup> *Pesquisador do LdTM, bolsista CNPq*

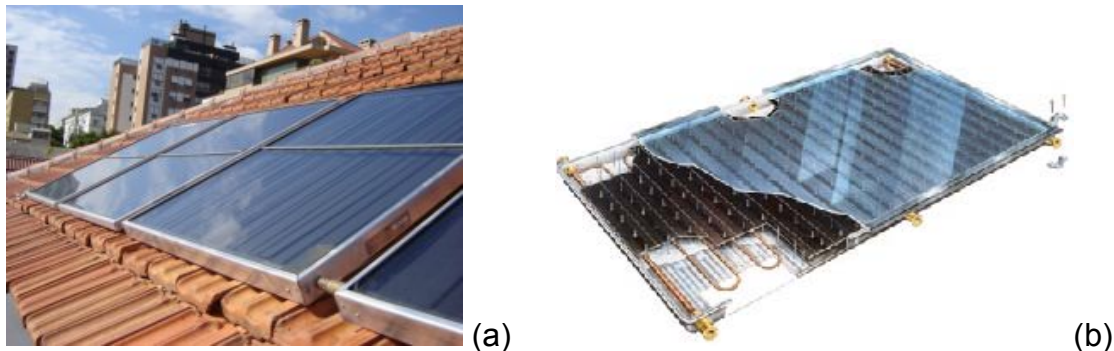
<sup>4</sup> *Pesquisador e aluno de mestrado do LdTM, bolsista CAPES*

<sup>5</sup> *Professor Dr.-Ing. Coordenador do LdTM (Laboratório de Transformação Mecânica – UFRGS)*

## 1 INTRODUÇÃO

No atual estágio de desenvolvimento global se faz necessária uma crescente produção energética, considerando o constante aumento da população e o anseio por melhores condições de vida.<sup>(1)</sup> O uso de energias renováveis, entre as quais energia eólica, hídrica, biomassa e energia solar, juntamente com o avanço tecnológico aplicado, são a base para um fornecimento adequado e seguro que permita um desenvolvimento cultural e econômico sustentável.

Uma possibilidade real seria o melhor aproveitamento da energia solar, onde suas principais aplicações estão voltadas para a geração de energia fotovoltaica e sistemas para aquecimento de água. Considerando o caso do Brasil, um país de clima tropical onde o sol aparece em média 280 dias por ano esta alternativa é especialmente atraente. No Brasil, banho quente ainda é sinônimo de chuveiro elétrico. Estima-se que cerca de 7% de toda a energia produzida tem como destino o chuveiro elétrico, isto equivale à energia consumida por todo estado do Rio Grande do Sul.<sup>(2)</sup> Torna-se assim evidente o grande mercado em potencial para os sistemas de aquecimento de água solar, de pequeno e médio porte (Figura 1a).



**Figura 1a.** Coletores solar para aquecimento residencial **1b.** Vista expandida de um coletor solar, detalhe para placa absorvedora e tubulação de cobre.<sup>(3)</sup>

Para esta aplicação, oferecem-se principalmente os coletores solares planos (Figura 1b). Com uma construção simples, eles fornecem ótimos resultados no aquecimento de água (a até 50°C). Sempre que possível são empregados sistemas gravitacionais com caixa d'água posicionadas á cima, evitando assim sistemas de bombeamento mais caros. Este é o tipo mais comum e barato de coletor solar, e é utilizado principalmente para o aquecimento de água em casas ou edifícios, hospitais, piscinas, secagem de grãos, também como apoio para um sistema de aquecimento de salas ou processos industriais de aquecimento (por exemplo, em conjunto com uma caldeira de gás).<sup>(4,5)</sup>

Coletores planos consistem, na maioria das vezes, de uma caixa de metal ou plástico, geralmente com uma altura de 10 cm a 15 cm e diversas dimensões e uma cobertura de vidro ou plástico de uma ou mais camadas (material isolante térmico). No interior, encontra-se uma placa absorvedora isolada contra as paredes (Figura 1b), este item é responsável pela absorção e transferência da radiação solar para o fluido sob a forma de energia térmica. Os materiais da placa absorvedora podem ser de alumínio, cobre, aço inox ou poliméricos, sempre recobertos por uma tinta preta ou escura para melhor absorção de energia.

O objetivo deste trabalho é aplicar novas técnicas de conformação de chapas para inovar a fabricação de coletores planos, mais especificamente para as placas absorvedoras. Estas são normalmente produzidas com chapas de Alumínio

soldadas em tubos de cobre em um processo de manual de produção. Utilizando novas tecnologias é possível melhorar processos de modo viabilizar uma produção automatizada de equipamentos e reduzir custo ao consumidor final.<sup>(6,7)</sup> Propõe-se a utilização da técnica de Estampagem Incremental (EI) para produzir o canal de passagem de água diretamente na chapa metálica. Para compor esse canal foi utilizada a técnica de união de chapas por atrito (Friction Stir Welding – FSW), ambos os processos descritos a seguir.

A pesquisa está sendo realizada no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), localizado no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, junto ao "Programa de Pós Graduação em Metalurgia, Minas e Materiais - PPGEM", com apoio do CNPq. A primeira fase do projeto intitulada: "Nova Tecnologia na Fabricação de Coletores Solares Visando Minimização de Consumo de Energia Elétrica", tem como objetivo produzir um novo coletor solar plano, de fabricação versátil e inovadora, com uma eficiência almejada consideravelmente maior aos tradicionalmente produzidos.

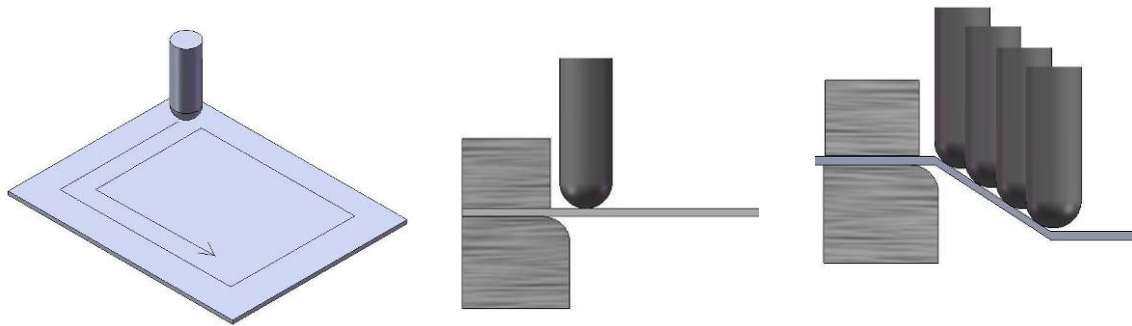
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Estampagem Incremental de Chapas

Os processos de estampagem convencionais, por questões econômicas, estão voltados para grandes escalas de fabricação com matrizes complexas e de alto custo.<sup>(8,9)</sup> Surge então o processo de *EI* como inovação tecnológica na área de conformação de chapas, tendo seu foco na produção de pequenos lotes e peças únicas (prototipagem), de forma relativamente rápida e com razoável precisão. Tornando possível produzir uma enorme variedade de produtos e componentes de geometrias complexas a partir de um ferramental simples e tempos de *set-up* reduzidos.<sup>(10,11)</sup> É um processo de características únicas, que apresenta consideráveis avanços sobre a estampagem convencional, porém ainda encontra-se em fase de desenvolvimento.

Esta técnica de Estampagem Incremental consiste em uma ferramenta simples do tipo punção de ponta esférica, um prensa-chapas, uma matriz de suporte e a geratriz. No processo, o punção promove pequenas deformações na chapa de forma progressiva, seguindo um caminho pré-determinado, até atingir a forma final desejada (Figura 2). O caminho da ferramenta é gerado com o auxílio de softwares CAD/CAM que alimentará posteriormente uma máquina CNC, onde é executada ou "estampada" a peça.<sup>(9,12-14)</sup>

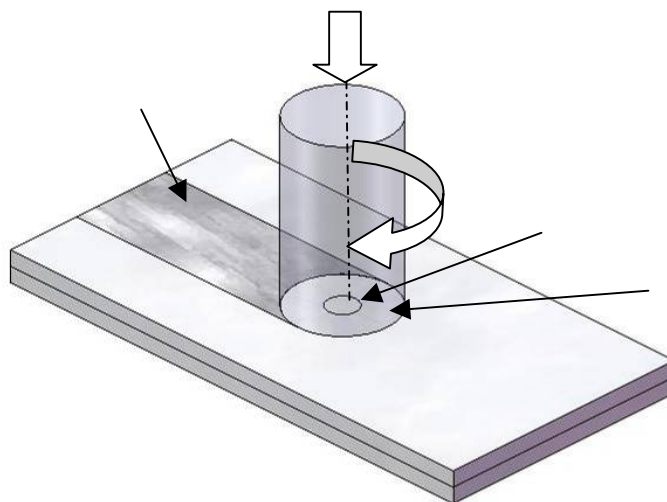
Os materiais mais utilizados são chapas finas com alta ductilidade. A redução da espessura é considerada a principal causa da falha de material em estampagem incremental.<sup>(12,15,16)</sup>



**Figura 2:** Estampagem Incremental, caminho da ferramenta promove deformações progressivas na chapa.<sup>(8)</sup>

## 2.2 União de Chapas por Atrito - Friction Stir Welding

O processo de *Friction Stir Welding* (FSW) foi desenvolvido, inicialmente, pela TWI em 1991 e é aplicado para união de peças em fase sólida.<sup>(17,18)</sup> A união de peças em fase sólida é um mecanismo que realiza a união sem atingir a temperatura de fusão dos materiais a serem unidos.<sup>(16)(18)</sup> Mesmo sendo um processo em desenvolvimento, já é bastante empregado na indústria, como por exemplo, pode-se citar: indústria aeronáutica, indústria aeroespacial, indústria militar, entre outras.<sup>(20,21)</sup> Basicamente o que realiza o processo de FSW é o atrito da rotação de uma ferramenta sobre a superfície que será unida, isto origina um aquecimento na região de contato, o que promove um aumento na plasticidade, conseqüentemente uma diminuição na viscosidade do material naquela região. Isto acarreta com que os materiais, juntamente com uma ferramenta apropriada, se misturem, mecanicamente, pela rotação da ferramenta causando a união dos materiais (Figura 3).<sup>(17,18)</sup>



**Figura 3:** Princípio do processo de solda por atrito (FSW), evidenciando parâmetros de controle.<sup>(22)</sup>

O principal motivo para se desenvolver este novo processo de soldagem, em chapas finas é que o processo FSW ocorre em fase sólida, representando muito menor tendência a distorções nas chapas, um dos principais problemas da união de chapas pelos métodos convencionais. Por não utilizar eletrodos ou materiais consumíveis, é possível soldar longas chapas, sem limite para o comprimento do cordão de solda, também não necessita de atmosfera controlada. Porém, necessita de um tempo de

estabilização da temperatura gerada por atrito. O processo de FSW alcança temperatura máxima, a qual não atinge a temperatura de fusão, de aproximadamente  $0,8T_{\text{fusão}}$  (Temperatura de Fusão)<sup>(22)</sup>.

Além destas vantagens, o que motivou a utilização de FSW neste trabalho, foi a facilidade de implementação do processo<sup>(16)(20)(22)</sup>, no caso deste trabalho utilizou-se de um centro de usinagem, um prensa-chapas e uma ferramenta apropriada para o processo. Outra vantagem fundamental para o projeto é a possibilidade de unir materiais considerados difíceis de soldar, tais como Cobre + Alumínio.

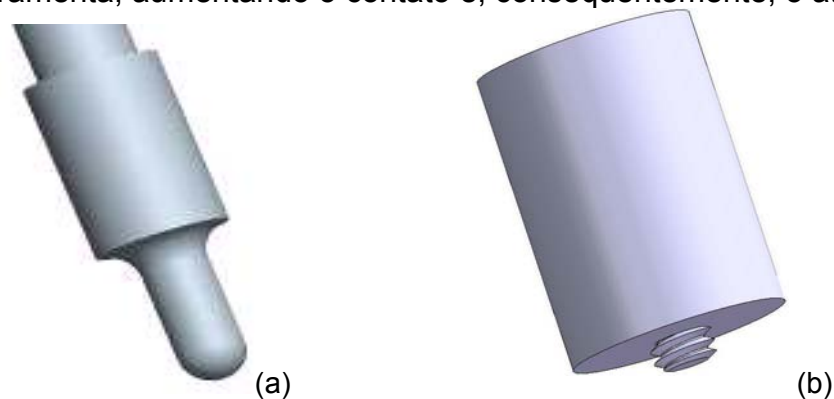
Vale salientar que cada união deverá corresponder a um projeto de ferramenta, uma vez que se leve em conta: as dimensões das chapas, tipo de união (Filete, Sobreposta etc), tipo de materiais, entre outros. O desenvolvimento de ferramentas é muitas vezes guardado como segredo industrial para certas empresas.<sup>(23) (24)</sup>

### 2.3 Procedimento Experimental

No desenvolvimento está sendo utilizada uma máquina CNC vertical de três eixos: Cincinnati Arrow 500. Esta possui uma mesa de movimentação de 500 mm nos eixos X/Y/Z, um eixo de rotação (Spindle) com alcance de 30 RPM à 6.000 RPM, além de um magazine de troca automática de ferramentas para alternar entre os processos de estampagem e união de chapas.

A trajetória da ferramenta é automaticamente gerada através de um software de CAD/CAM. Neste estudo utilizou-se o ProEngineer™ e Pro/NC™, ambos fabricados pela PTC (Parametric Technology Company). O programa NC gerado passa por um pós-processamento onde o código é adaptado para a CNC Cincinnati.

As ferramentas utilizadas em ambos os processos possuem uma geometria simples. Para EI (Figura 4a), a ferramenta é constituída de uma ponta semi-esférica de 10 mm de diâmetro, utilizada com rotação para reduzir o atrito com a chapa. Na etapa seguinte, é desejado o efeito inverso, a rotação é aplicada a ferramenta de FSW com intuito de gerar atrito e promover a solda (Figura 4b). Esta possui um pino de mistura com 2 mm de diâmetro e uma rosca para promover um maior fluxo do material. Rotacionando no sentido horário, a rosca também “puxa” as chapas contra o pescoço da ferramenta, aumentando o contato e, conseqüentemente, o atrito.<sup>(22)</sup>



**Figura 4:** Geometrias das ferramentas utilizadas para EI (a) e FSW (b).

A metodologia adotada para a EI segue o conceito SPIF (*Single point incremental forming*),<sup>(26)</sup> otimizada pelo processo *Back Drawing*.<sup>(27)</sup> A técnica de *Back Drawing* consiste em utilizar uma matriz de suporte à chapa, com o objetivo de aumentar a precisão e evitar empenamentos da chapa. Esta matriz de suporte pode ser fabricada utilizando materiais de menor custo e fácil usinagem, como polímeros,

resinas, madeira e compósitos. No caso, foram utilizadas matrizes de suporte em Poliuretano, representando a forma dos canais de passagem de água pela placa absorvedora (Figura 5). A matriz foi produzida a partir de um conceito modular, permitindo a montagem de diversas geometrias para o absorvedor solar.

Para prender as chapas utilizou-se um prensa chapas desenvolvido no LdTM da UFRGS, uma vez que a firmeza das placas à mesa de trabalho é de fundamental importância, principalmente para o processo de FSW.

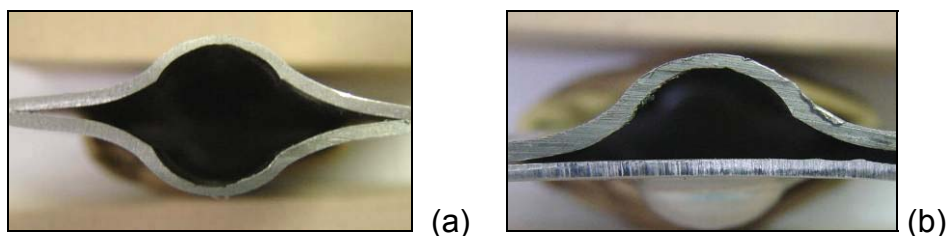
Uma vez determinados os parâmetros de processo, desenvolvido o ferramental e traçada a estratégia de “usinagem”, foram realizados ensaios iniciais de modo a aprovar o emprego destes novos processos para o uso em coletores solares. Para os ensaios iniciais, foram usadas chapas com 1 mm de espessura da liga de alumínio 1100 de acordo com a norma ASTM B 209.

Vários testes foram feitos com o intuito de evidenciar os melhores parâmetros para ambos os processos, inicialmente baseados na literatura científica disponível. Os melhores resultados alcançados foi com os seguintes parâmetros: Rotação 1250 RPM, Velocidade media de avanço de 2 mm/s. Para estampar o canal, foi utilizada uma estratégia incremental tipo “helicoidal”, com passe de 1mm de avanço no eixo “Z”, com a profundidade final de 5 mm (5 passes). A Figura 5 ilustra os passos da Estampagem Incremental.



**Figura 5:** Etapas práticas do processo de Estampagem Incremental.

Posterior ao processo de Estampagem é adicionada mais uma chapa sobre a estampada, após a troca de ferramenta, é feita a união das chapas por atrito. A geometria do perfil do canal de passagem de água pode ser um espelho da chapa estampada (Figura 6a). Ou para simplificar o processo, pode ser utilizada uma chapa sem deformação, formando um “meio canal” como ilustrado na Figura 6b.

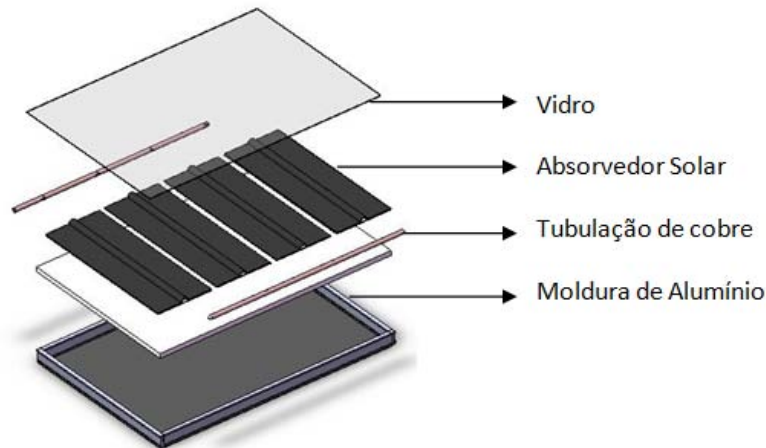


**Figura 6:** Canais do Absorvedor, perfil das possíveis geometrias constituídas de uma (a) ou duas chapas estampadas (b).

Nota-se uma limitação do processo de EI, a incapacidade de gerar cantos e ângulos retos. Apesar disto, considerando a aplicação para absorvedores, o raio da matriz é benéfico, pois aumenta a região de contato do liquido com a chapa.

Foram preparados corpos de prova para análise metalográfica da região da solda. Estes foram lixados e polidos, atacados posteriormente com a reagente Marble; para a seção transversal de união. As regiões superiores da solda e não sofreram qualquer preparativo para análise.

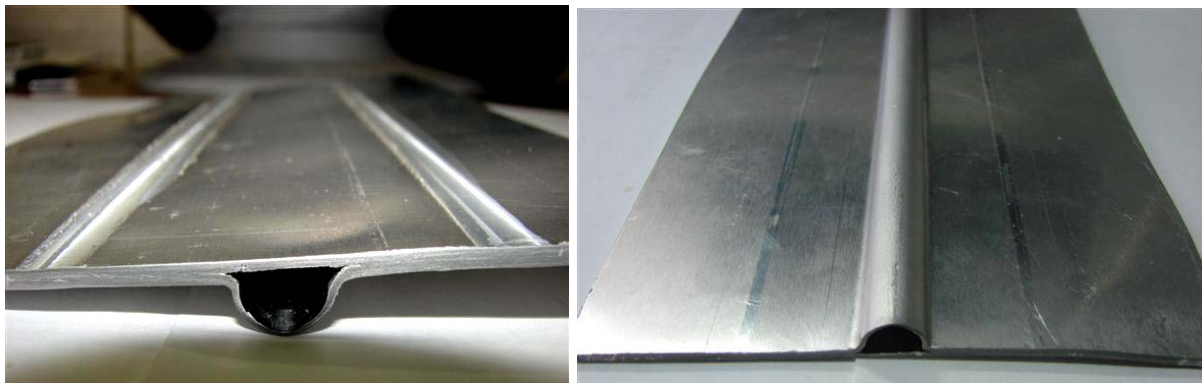
A Figura 7 representa a construção do coletor solar baseado nos modelos comerciais mais vendidos, no caso, o absorvedor solar e constituído diversos canais simples montados lado a lado. Este será o modelo do protótipo a ser construído.



**Figura 7:** Modelo da placa do absorvedor, canais gerados por Estampagem Incremental e união das chapas por atrito (FSW).

### 3 RESULTADOS

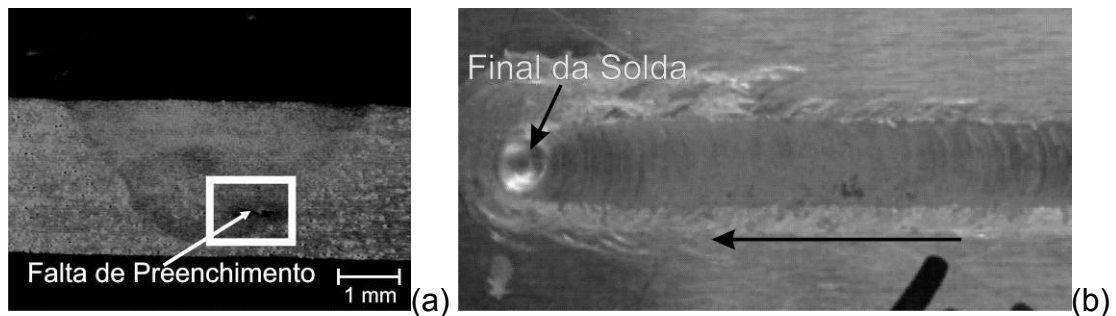
Foram produzidas quatro canais de passagem de água baseados na estrutura de um modelo de coletor comercial (Figura 7). A Figura 8 mostra a placa do coletor produzida com o perfil de “meio canal”. Na vista superior é possível observar as linhas de solda. Na parte superior do canal, houve uma redução de 40% na espessura, formando um canal com altura de 6 mm (interno).



**Figura 8:** Placa do absorvedor produzida, canais gerados por Estampagem Incremental e união das chapas por atrito (FSW).

Uma das grandes dificuldades do trabalho foi a elevada ductilidade do alumínio comercialmente puro. A aplicação de uma força pontual na chapa gerava empenamentos, este efeito foi reduzido pela matriz de suporte. A mesma matriz foi fundamental para o sucesso da solda por atrito, uma vibração do conjunto, por menor que seja, gerava falhas e conseqüentemente a perda do experimento.

Para o a solda, as chapas devem ser firmemente fixadas com o prensa chapas, para que não haja folgas e ou vibrações. A mesma matriz de suporte utilizada na EI, agora serve de calço para o FSW. A Figura 9 mostra os primeiros cordões de solda, com seu desenho característico e buraco deixado pela ferramenta. Apesar de ser considerado um bom resultado inicial, a qualidade da solda ainda precisa ser melhorada. Nota-se na figura que as chapas se uniram na região de mistura dos grãos, nesta mesma região também é possível observar uma pequena falha de preenchimento na região representada. Na Figura 9(b) mostra a aparência do cordão de solda, neste caso, a vista de topo apresenta um aspecto livre de defeitos, fato verificado como não verdadeiro na Figura 9(a).



**Figura 9:** (a) vista perpendicular da união das chapas; (b) vista de topo de união das chapas sobrepostas.

#### 4 DISCUSSÃO

Dentre os diversos tipos de coletores, em relação ao custo versus aproveitamento térmico de energia solar, os coletores solares planos oferecem o maior potencial de economia de energia. Podem ser instalados facilmente e oferecem um campo vasto de aplicação. Os coletores podem ser aproveitados tanto para o aquecimento de água industrial quanto para o aquecimento de ambientes, esta tecnologia está sendo desenvolvida intensamente em todo o mundo. No Brasil há oportunidades e possibilidades de desenvolvimento extraordinárias.

A Estampagem Incremental é a alternativa possível para prototipagem rápida e para fabricação de pequenos lotes que normalmente exigiriam um ferramental de alto custo. Graças a este grande poder de customização, a *EI* tem recebido muita atenção, gerando um produto diferenciado para o consumidor final. Entretanto, propriedades mecânicas particulares podem introduzir retornos elásticos. Este fato ocorre em zonas da chapa em que o punção não atua e também pode estar sujeito à presença de movimentos rígidos. Em outras palavras, uma grande parte da chapa está livre para dobrar e a geometria final pode ser um pouco diferente da geometria desejada.

O processo de união de chapas por atrito (*FSW*) demonstrou ser bastante versátil para a união de chapas de ligas leves. Foi possível obter uma união já nos primeiro ensaios, é claro que mais pesquisa se faz necessário com intuito de melhorar a qualidade da solda obtida. As maiores dificuldades observadas apontam para o design da ferramenta e o modo com que ela promove a “mistura dos grãos”, outro parâmetro importante é o monitoramento da temperatura na região de mistura de modo a atingir a faixa de maior plasticidade.

Com relação ao material utilizado, inicialmente optou-se pelo alumínio. Sabe-se que esse tem seu uso restrito na Europa na aplicação em coletores solares. Para



próxima etapa está previsto a utilização de Cobre e uma pesquisa sobre possíveis soluções para o problema de corrosão do Alumínio, visto que este possui vantagens econômicas. Também está previsto a utilização de chapas mistas de cobre e alumínio, unidas por FSW.

## **5 CONCLUSÃO**

Ambos os processos possuem um princípio simples de funcionamento e fazem uso de ferramentas de geometria simples e de fabricação fácil. Apesar disso, necessitam de uma máquina dedicada para sua aplicação. Demonstramos através deste trabalho que é possível utilizar as duas técnicas em conjunto, aplicadas em um centro de usinagem CNC. Vale lembrar que estes processos, do ponto de vista do consumo e o modo em que são aplicados, são considerados de alta eficiência energética.

Os resultados preliminares obtidos aprovam o emprego destas novas tecnologias para a fabricação de coletores solares planos, ressaltando a versatilidade de formas para o processo de produção. A metodologia desenvolvida neste estudo pode certamente ser empregada para projetos de diferentes tipos de componentes estampados. Ainda que este processo de fabricação seja mais lento e com menor precisão dimensional, o leque de possibilidades de produção em pequenos lotes, com o uso da metodologia para diferentes aplicações, é promissor. As evidências que fazem o diferencial na utilização do processo devem ser consideradas, e os pontos em aberto para pesquisa como a busca pela extrema precisão, criam novos caminhos e desafios a serem superados.

### **5.1 Possibilidades e Rumos da Pesquisa**

- Utilização de novos materiais de ligas leves;
- Tratamentos superficiais para evitar a corrosão do Alumínio;
- União de diferentes materiais (Cobre + Alumínio);
- Utilizar chapas “Tailored Blanks” unidas por FSW;
- Diferentes geometrias de absorvedores.

### **Agradecimentos**

Agradeço a todos que tornaram possível a realização deste trabalho, principalmente para a UFGRS, o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), ao Grupo de desenvolvimento de energias renováveis (GDER) e os órgãos financiadores : CNPq e empresa EPI Ltda.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 IADB, INTER-AMERICAN DEVELOPMENT BANK. Planning and Brazilian Energy Matrix. Disponível em: <http://www.iadb.org/news/docs/USABIDEnglish.pps>. Julho, 2006.
- 2 GLOBO NEWS, Programa de TV “Cidades e Soluções”, apresentado em 15/10/2006. Disponível em: <http://globonews.globo.com/Jornalismo/Gnews/0,,7493-p-28012007,00.html>.
- 3 Soletrol. Disponível em: <http://www.soletrol.com.br>

- 4 DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes; 3ed; Ed. John Wiley & Sons, Inc.; 908 pages; 2006.
- 5 KALOGIROU, S.A. Solar thermal collectors and applications. J. Progress in Energy and Combustion Science, v. 30, p. 231-295, 2004.
- 6 SCHAEFFER, L. Conformação de chapas metálicas. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.p. 156-159.
- 7 FERRARINI, J.L.; Caracterização de chapas para estampagem. Dissertação de Mestrado. PPGEM/UFRGS. 2004
- 8 HINDMAN, C.; OUSTERHOUT, K. B. Developing a flexible sheet forming system. J. Mater. Process. Technology, v. 99, p. 38-48 ,2000.
- 9 HIRT, G.; JUNK, M.; BAMBACH, M.; CHOUVALOVA, I.; AMES, J. Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation. VI Conferencia Nacional de Conformação de Chapas, 2003. p. 30-38.
- 10 ALLWOOD, J.M. AND UTSUNOMIYA, H. A survey of flexible forming processes in Japan. International Journal of Machine Tools and Manufacture, In Press, Corrected Proof, Available online 11 April 2006.
- 11 KOPAC, J. AND KAMPUS, Z. Incremental sheet metal forming on CNC milling machine-tool. J. Mater. Process. Technology, v. 162-163, p. 622-628, 2005.
- 12 AMBROGIO, G.; DE NAPOLI, L.;FILICE, L.;GAGLIARDI, F.;MUZZUPAPPA, M. Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing. J. Mater. Process. Technology, v. 162-163, p. 156-162, 2005.
- 13 KITAZAWA, K AND NAKAJIMA, A. Cylindrical incremental drawing of sheet metals by CNC incremental forming process. In Advanced technology of plasticity 1999, Proceedings of the Sixth International Conference on Technology of Plasticity, 1999, pp. 1495-1500 (Springer, Nuremberg).
- 14 DAI, K.; WANG, Z.R.; FANG, YI. CNC incremental sheet forming of an axially symmetric specimen and the locus of optimization. J. Mater. Process. Technology, v. 102, p. 164-167, 2000.
- 15 HUSSAIN, G. GAO, L.. A novel method to test the thinning limits of sheet metals in negative incremental forming. International J of Machine Tools and Manufacture - In Press, Corrected; 2006
- 16 AMBROGIO, G.; CONSTANTINO, L.; DE NAPOLI, L.; FILICE, L.; FRATINI, MUZZUPAPPA, M. Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in Incremental Forming a numerical and experimental investigation. J. Mater. Process. Technology, v. 153-154C, p. 501-507, 2004.
- 17 ASM, METALS HANDBOOK . Welding, Brazing and Soldering, Volume 6 – American Society for Metals, Ohio, 1989.
- 18 BONOME. E. C; CARLETTI. C. B ; ALCÂNTARA,N. G ; SANTOS. J. F. Soldagem por Fricção Linear – FSW Aplicada em Tailored Blanks, Soldagem Insp., v. 11, n. 2, p. 79-84, Abr/Jun 2006.
- 19 MACHADO, I. G. Soldagem e técnicas conexas: Processos. Porto Alegre, 1996.
- 20 MISHRA. R. S.; MA. Z. Y. Friction stir welding and processing. Materials Science and Engineering, v. 50, p. 1–78, 2005.
- 21 ROSADO JR. ABEL. Tese de Doutorado - Estrutura Integral por Soldagem por Atrito “Friction Stir Welding - FSW”. Requisito Básico para o Projeto Estrutural, Ita - São José dos Campos. SP, Set 2003
- 22 THOMAS, W. M.; THREADGILL, P. L.; NICHOLAS, E. D. The feasibility of friction stir welding steel. TWI – The Welding Institute, em <http://www.twi.co.uk>, 1999

- 23 AWS, WELDING HANDBOOK. Welding Processes, Volume 2 – American Welding Society, Miami, 2004.
- 24 ELANGO VAN. K ; BALASUBRAMANIAN. V. Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering* , v. 459, p. 7–18, 2007.
- 25 CAVALIERE. P.; CAMPANILE. G. ; PANELLA. F. ; SQUILLACE. A. Effect of welding parameters on mechanical and microstructural properties of AA6056 joints produced by Friction Stir Welding. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 180, p. 263–270, 2006.
- 26 CERRO, I.; MAIDAGAN, E.; ARANA, J.; RIVERO, A. AND RODRÍGUEZ, P. Theoretical and experimental analysis of the dieless incremental sheet forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 177, Issues 1-3, p. 404-408 ,3 July 2006.
- 27 ATTANASIO, A. CERETTI, E. AND GIARDINI, C. Optimization of tool path in two points incremental forming. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 177, Issues 1-3, p. 409-412 , 3 July 2006