



Estudo da viabilidade técnica de coletores solares conformados por estampagem incremental de chapas de alumínio

Gilson de March¹
Lírio Schaeffer²
Anderson Daleffe³
Daniel Fritzen⁴
Henrique Cechinel Casagrande⁵
Max Gabriel Steiner⁶
Joelson Vieira da Silva⁷
Pedro Henrique Menegaro Possamai⁸

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo investigar a viabilidade técnica da estampagem incremental (*Single Point Incremental Forming – SPIF*) na conformação de canais em chapas de alumínio 1200 H14, com aplicação voltada a coletores solares térmicos. A conformação incremental permite deformações plásticas localizadas sem a necessidade de matrizes rígidas, sendo ideal para produção flexível e geometrias complexas. Para a avaliação da conformabilidade do material, foram realizados ensaios de Nakajima, possibilitando a construção da Curva Limite de Conformação (CLC), que indicou deformações principais (φ_1) próximas de 0,18 na região crítica, demonstrando boa estampabilidade. A caracterização da deformação plástica foi realizada por meio da técnica de visioplasticidade, utilizando marcação circulares para análise do alongamento das elipses pós-processo. A linha de fratura obtida atingiu valores de φ_1 superiores a 1,0, indicando que o material é capaz de suportar altos níveis de deformação antes da ruptura, o que reforça sua adequação para o processo SPIF. Na etapa térmica, as placas conformadas foram submetidas a simulações computacionais de eficiência energética. Os resultados mostraram um comportamento térmico estável e distribuído de forma uniforme nos canais conformados, com valores de rendimento térmico próximos aos obtidos em coletores convencionais com tubos de cobre. Essa equivalência funcional, aliada à redução de custo e à flexibilidade do processo, evidencia o potencial do uso da estampagem incremental na fabricação de componentes térmicos metálicos para sistemas de energia solar.

Palavras-chave: Alumínio 1200 H14; Curva Limite de Conformação (CLC); Estampagem incremental; Coletores solares; Simulação térmica; Radiação solar.

¹ Doutorando, UNISATC. E-mail: gilson.march@satc.edu.br

² Doutor, UFRGS. E-mail: schaefer@ufrgs.br

³ Doutor, UNISATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁴ Doutor, UNISATC. E-mail: Daniel.fritzen@satc.edu.br

⁵ Doutorando, UFSC. E-mail: henrique.casagrande@nione.tec.br

⁶ Mestre, UNISATC, E-mail: max.steiner@satc.edu.br

⁷ Doutorando, UFRGS, E-mail: joelson.silva@satc.edu.br

⁸ Mestrando, UNISATC, E-mail: pedro.possamai@satc.edu.br



1 INTRODUÇÃO

Diante dos desafios atuais da indústria em reduzir custos e otimizar processos com flexibilidade e eficiência energética, a aplicação de novos materiais e tecnologias tem sido uma estratégia recorrente. Neste cenário, destaca-se a Estampagem Incremental de Chapas (*Incremental Sheet Forming – ISF*), processo que vem ganhando destaque por permitir a produção de geometrias complexas sem a necessidade de ferramentas específicas, sendo amplamente aplicada em prototipagem e pequenas séries [1]; [2]; [3]; [4].

A ISF apresenta vantagens relevantes quando comparada à conformação convencional, como a eliminação de moldes rígidos, baixo custo operacional, alta taxa de conformabilidade e viabilidade para ajustes geométricos rápidos [5]; [6]. Estas características a tornam ideal para aplicações com geometrias variáveis, como implantes biomédicos, peças automotivas especiais e, mais recentemente, componentes para coletores solares térmicos [3]; [7].

O presente estudo tem como foco a aplicação da ISF para conformar canais diretamente em chapas de alumínio ASTM/ABNT 1200 H14 com espessuras de 1,5 mm, substituindo as tradicionais serpentinas de cobre empregadas nos coletores solares planos. A liga 1200 H14 é composta por aproximadamente 99% de alumínio, apresentando elevada condutividade térmica, boa resistência à corrosão e excelente conformabilidade, além de ser leve e economicamente viável [3]; [8]; [9]; [20]; [21]. Essas propriedades tornam o material promissor para aplicações térmicas que demandam alta eficiência de transferência de calor.

No contexto energético, o Brasil destaca-se como uma das nações com maior potencial de geração de energia solar, devido à elevada radiação global média em seu território [9]; [10]. Estima-se que cerca de 25% da energia elétrica consumida em residências brasileiras seja destinada ao aquecimento de água, o que reforça a importância de tecnologias térmicas mais acessíveis e sustentáveis, como os coletores solares planos [11]; [12].

No entanto, os modelos convencionais de coletores empregam tubos de cobre soldados à placa absorvedora, processo que eleva os custos e limita o aproveitamento térmico em virtude do contato parcial entre os elementos [13]; [14]. A aplicação da ISF neste contexto propõe a formação de canais diretamente na chapa,



promovendo maior contato térmico com o fluido e reduzindo etapas de fabricação como corte, dobra e solda. Estudos recentes apontam que essa abordagem é capaz de manter ou até melhorar a eficiência térmica do sistema, ao mesmo tempo em que reduz significativamente o uso de materiais caros e etapas manuais de fabricação [15]; [16]; [17].

Dessa forma, o objetivo deste artigo é investigar a viabilidade técnica da estampagem incremental na fabricação de canais em chapas de alumínio para coletores solares térmicos, com ênfase na caracterização do material, definição da Curva Limite de Conformação (CLC) e validação geométrica dos canais conformados. A metodologia inclui experimentos com diferentes geometrias (cone e pirâmide), ensaio de tração e o método de Nakajima para mapeamento das deformações, bem como testes comparativos de desempenho térmico entre os coletores produzidos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

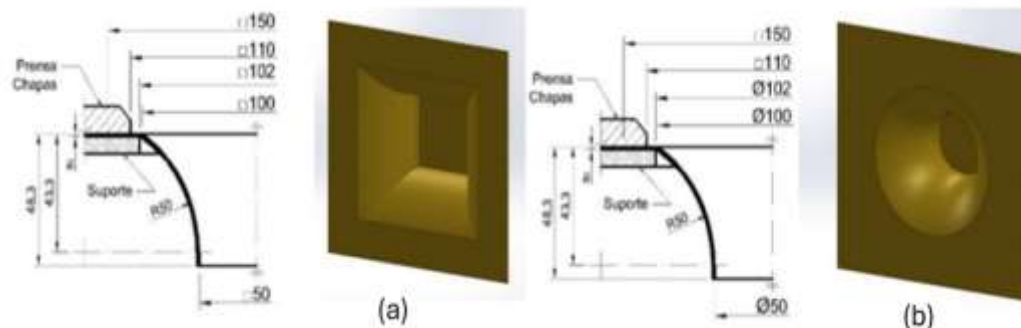
O trabalho a seguir abordará as principais etapas do processo de estampagem incremental aplicado à fabricação dos canais do coletor solar, destacando desde a conformação da chapa até a obtenção da geometria final necessária para o funcionamento do sistema.

2.1 ESTAMPAGEM INCREMENTAL

As deformações da chapa, foram definidos dois modelos geométricos para obtenção do ângulo máximo de conformação (Ψ), ambos com perfil de parede radial, sendo estes em formato de pirâmide e cone, já utilizados na literatura, segundo apresentado por Fritzen [18]. Foram realizados seis experimentos para cada formato, totalizando doze corpos de prova. Para cada formato de pirâmide e cone, foram utilizados três corpos de prova com incremento de 0,2 mm e três com incremento de 0,5 mm, permitindo a análise comparativa entre diferentes parâmetros de conformação.

A criação dos modelos 3D para estampagem foi realizada no software SolidWorks®, com base nas especificações apresentadas na Figura 1.

Figura 01: Desenho para estampagem: (a) modelo pirâmide; (b) modelo cone.



Fonte: Adaptado de [18]

Os parâmetros utilizados no processo da SPIF para o Centro de Usinagem CNC estão descritos na Tabela 0101:

Tabela 01: Parâmetros SPIF cone e pirâmide.

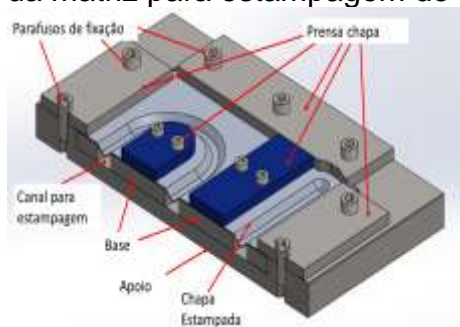
Descrição	Valor
Incremento Vertical (Δ_z)	0,2 e 0,5 mm
Velocidade de Avanço (f)	1.000 mm/min
Rotação da ferramenta (N)	Livre
Perfil da geometria da parede: Circular	50 mm

Fonte: Do autor

2.2 FABRICAÇÃO DAS PLACAS DO COLETOR SOLAR POR SPIF

Utilizou-se uma base com canais usinados de 20 mm de profundidade e largura na base inferior, e um prensa chapa superior parafusada para fixar a chapa a ser conformada a curvatura dos canais, como ilustrado na Figura 02

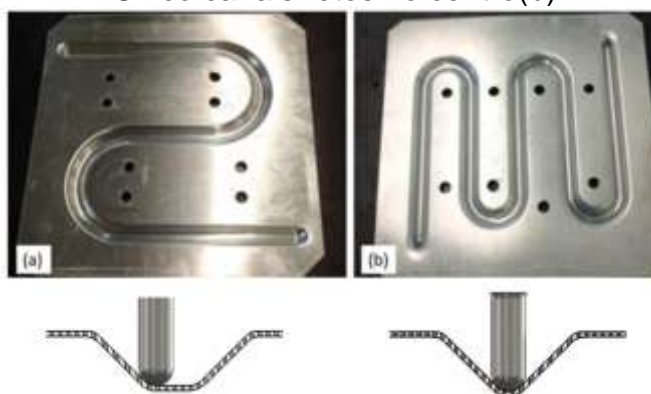
Figura 021: Desenho da matriz para estampagem de canais de coletor solar



Fonte: Do autor

Foram definidas duas configurações de canais na placa, uma com três e outra com cinco canais retos e paralelos entre si, utilizando estratégias de conformação do tipo contorno e central, conforme ilustrado na Figura 03. O processo empregou o mesmo procedimento aplicado na conformação dos formatos pirâmide e cone, utilizando lubrificante líquido VG 68 para reduzir o atrito entre a ferramenta e a chapa durante a estampagem incremental [24].

Figura 03: Configuração de diferentes canais: Três canais retos de contorno (a); Cinco canais retos no centro(b).



Fonte: Do autor

Os parâmetros utilizados para o processo de estampagem incremental, foi adotada uma estratégia de incremento vertical (Δz) do tipo paralela, com valor fixo de 0,5 mm, aplicada de forma contínua ao longo da trajetória da ferramenta. Essa configuração foi utilizada tanto no centro quanto no contorno dos canais, com profundidade de 10 mm, visando garantir a conformidade geométrica e a integridade estrutural da chapa. Os parâmetros operacionais utilizados na máquina estão organizados na Tabela 02.

Tabela 02: Parâmetro estampagem canal.

Descrição	Valor
Incremento Vertical (Δz)	0,5 mm
Velocidade de Avanço (f)	1.000 mm/min
Rotação da ferramenta (N)	Livre
Profundidade do canal da peça (centro e contorno)	10 mm

Fonte: Do autor

Para analisar a resistência do material na estampagem incremental dos canais, a repetição do incremento vertical (Δz) foi feita até se atingir o rompimento peça.

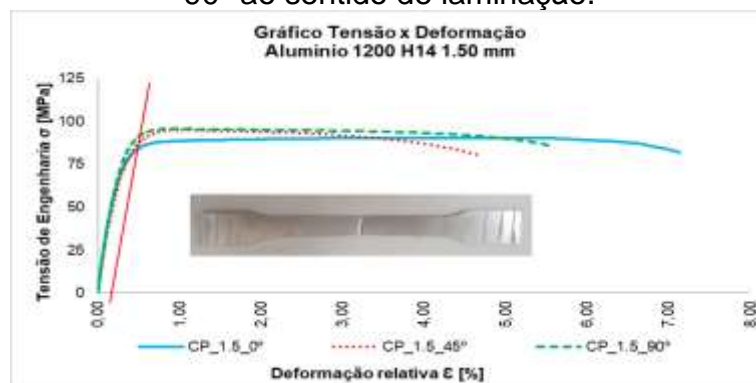
3 ANÁLISE DOS DADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados, com o objetivo de avaliar os parâmetros aplicados na Estampagem Incremental.

3.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados das curvas tensão x deformação para as três direções (0° , 45° e 90°) indicam variações significativas no comportamento mecânico do material conforme Fig 04.

Figura 04: Curva Tensão x Deformação média para os corpos de prova a 0° , 45° e 90° ao sentido de laminação.



Fonte: Do autor

A transição do regime elástico para o regime plástico de cada direção dos corpos de prova é determinada traçando-se uma linha reta paralela à região elástica das curvas, em 0,2% na deformação relativa (ϵ). O ponto de interseção dessa linha com a curva indica a tensão de escoamento (σ_e) para cada direção do material [18]; [29].

Os ensaios de tração realizados permitiram obter os valores de deformação relativa (ϵ), alongamento (δ), tensão máxima (σ_B) e a curva de escoamento do material conforme Tabela03.

Os valores de alongamento (δ) e área inicial (s_0) foram obtidos por medição na chapa, antes e depois de rompida.

Tabela 03: Dados dos ensaios de tração 0°, 45° e 90° obtidos do alumínio 1200 H14 com espessura de 1,5mm.

Orientação do corpo de prova	σ [MPa]	σ_e e 0,2 [MPa]	ϵ [%]	δ [mm]
0°	90,48	85,09	7,1	5,71
45°	95,15	89,79	4,6	3,72
90°	95,84	92,75	5,6	4,48

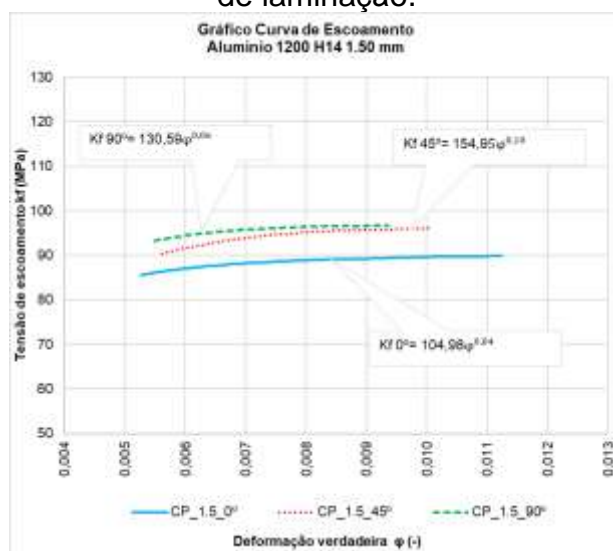
Fonte: Do autor

Observa-se que a maior deformação ocorre na direção de laminação, corroborando os dados apresentados por Teixeira [19], CBA [9], Donato [20], Cardoso [21], Lima [22] e Barros [23]. Esses resultados destacam a influência significativa da orientação da laminação na resistência e na deformação do material, tornando esse fator importante para a otimização do processo de estampagem incremental.

3.1.1 Curva de Escoamento

A Figura 05 representa a curva de escoamento do alumínio 1200 H14 com 1,5mm de espessura, nos diferentes sentidos de laminação da chapa: 0°, 45° e 90°.

Figura 05: Curvas de escoamento do alumínio 1200 H14 em 0°, 45° e 90° no sentido de laminação.



Fonte: Do autor



A análise dos valores de tensão de escoamento (K_f) em diferentes direções de laminação, Figura 05 e Tabela 7, revelou uma média de $K_f = 130,17 \cdot \varphi^{0,07}$, indicando comportamento mecânico estável nas faixas de deformação estudadas. Os dados obtidos são fundamentais para prever o desempenho do material em processos industriais, permitindo maior controle sobre os parâmetros de conformação. A apresentação dos valores de K_{f_0} (tensão inicial de escoamento) e do coeficiente de encruamento (n) por orientação fornece uma compreensão detalhada da influência da anisotropia no comportamento do material, essencial para a otimização de processos como a estampagem incremental.

Tabela 04: Propriedades mecânicas dos corpos de prova de 0° , 45° e 90° no sentido de laminação obtidas do alumínio 1200 H14 com $s_0 = 1,50$ mm.

Orientação do corpo de prova	K_f [MPa]	K_{f_0} [MPa]	n
0°	104,98	85,4	0,04
45°	154,95	90,29	0,10
90°	130,59	93,26	0,06

Fonte: Do autor

Conforme Donato [20] e Schreiber [24], a curva de escoamento do material apresenta resultados consistentes, independentemente da orientação de laminação dos corpos de prova, com valores próximos aos obtidos nos ensaios realizados. Entretanto, os resultados apresentados no gráfico evidenciam diferenças significativas entre as orientações analisadas, destacando a relevância de considerar as propriedades anisotrópicas do material em aplicações específicas.

3.2 ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES

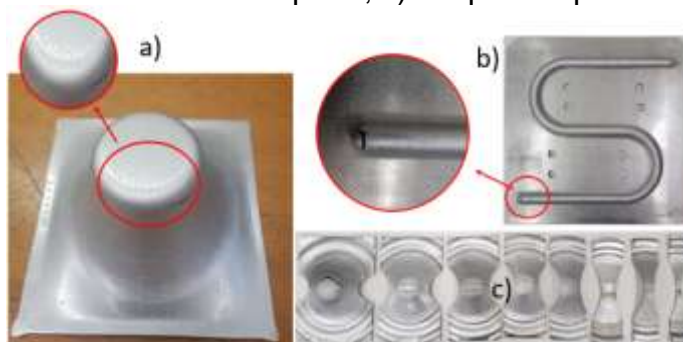
Com os resultados dos valores das elipses de todos os corpos de prova, tornou-se possível a plotagem das FLC da estampagem incremental das pirâmides, cones e das placas coletoras e CLC do ensaio de Nakajima. Os resultados demonstraram que a geometria da peça e o incremento vertical (Δ_z) influenciam significativamente o comportamento do material.

Nos corpos conformados em forma de pirâmide, observou-se que um menor incremento vertical ($\Delta_z = 0,2$ mm) proporcionou maior resistência à fratura, indicando melhor distribuição de tensões e maior estabilidade do processo em comparação ao incremento de 0,5 mm. De forma similar, os resultados obtidos na conformação em formato de cone apresentaram comportamento compatível com o da pirâmide, porém com leve predominância de deformação biaxial (φ_2), sugerindo um estado de tensões mais distribuído.

A análise das placas absorvedoras dos coletores solares conformadas por SPIF revelou uma linha de fratura compatível com os demais formatos, com valores de φ_1 superiores a 1, o que confirma a alta capacidade de deformação plástica do alumínio 1200 H14 antes da ruptura, favorecida pela uniformidade das tensões e ausência de concentrações críticas.

No ensaio de Nakajima, corpos de prova com diferentes larguras foram deformados até a fratura, permitindo traçar a Curva Limite de Conformação (CLC) do material. A análise das elipses ao redor das trincas indicou valores médios de deformação principal (φ_1) próximos a 0,18 na região crítica, representando o limite típico para estampagem convencional. Os dados obtidos revelaram um comportamento coerente com os valores teóricos descritos por Schreiber [24] e Park [25], validando a metodologia empregada.

Figura 06: Deformações das geometrias: a) Peça estampada com geometria de cone; b) Placa absorvedora estampada; c) Corpos de prova ensaio Nakajima

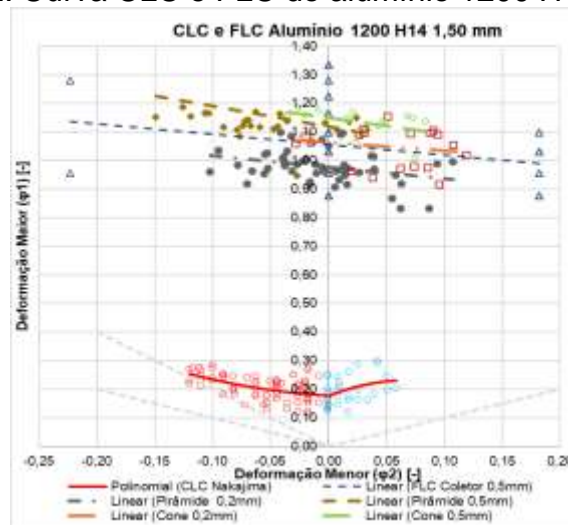


Fonte: Do autor

A comparação entre os resultados dos ensaios incrementais (FLC) e convencionais (CLC) mostra que o alumínio 1200 H14 1,5 mm é capaz de suportar deformações superiores às previstas para processos convencionais conforme

descreve Park [25] e Teixeira [26], atingindo valores de φ_1 acima de 1 em condições específicas. Esses resultados indicam maior potencial de conformação do material quando submetido ao processo SPIF, evidenciando sua adequação para aplicações com altos níveis de deformação plástica, como na fabricação de coletores solares conformados diretamente por estampagem incremental.

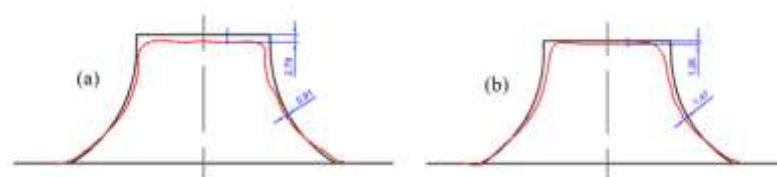
Figura 2: Curva CLC e FLC do alumínio 1200 H14 1,5mm



Fonte: Do autor

A avaliação do perfil geométrico das peças conformadas por SPIF é essencial para compreender os efeitos do retorno elástico sobre a precisão dimensional final [28]. A comparação entre o modelo CAD e as geometrias reais obtidas por medição tridimensional permite identificar as discrepâncias causadas por deformações elásticas residuais. A Figura 08 apresenta os resultados da medição tridimensional das peças estampadas com incrementos verticais (Δz) de 0,2 mm e 0,5 mm:

Figura 08 – Comparação entre geometria projetada e medida em máquina tridimensional: a) Incremento de 0,2 mm; (b) Incremento de 0,5 mm.



Fonte: Do Autor



As medições indicaram que o incremento menor ($\Delta z = 0,2$ mm) apresentou maior retorno elástico, devido à menor deformação plástica acumulada, o que favorece a recuperação elástica após a liberação das tensões internas. Esse comportamento corrobora os apontamentos de Allwood [28], que relaciona incrementos mais sutis a maior imprecisão dimensional. Por outro lado, incrementos maiores ($\Delta z = 0,5$ mm) geram conformações mais estáveis, com menor desvio médio em relação ao modelo teórico.

Além disso, foi realizada a análise do ângulo de parede (Ψ), obtido geometricamente pela inclinação formada entre a trajetória da ferramenta e o plano horizontal da peça. Os resultados estão expressos na Tabela 05:

Tabela 05: Ângulo de parede da estampagem incremental cone e pirâmide

Tipo	Incremento [mm]	Profundidade [mm]	Ângulo [°]	s_0 [mm]	S_1 [mm]
Cone	0,20	46,54	88,17	1,50	0,04790
Cone	0,50	46,21	87,82	1,50	0,05706
Pirâmide	0,20	45,37	86,95	1,50	0,07981
Pirâmide	0,50	47,24	88,90	1,50	0,02880

Fonte: Do Autor

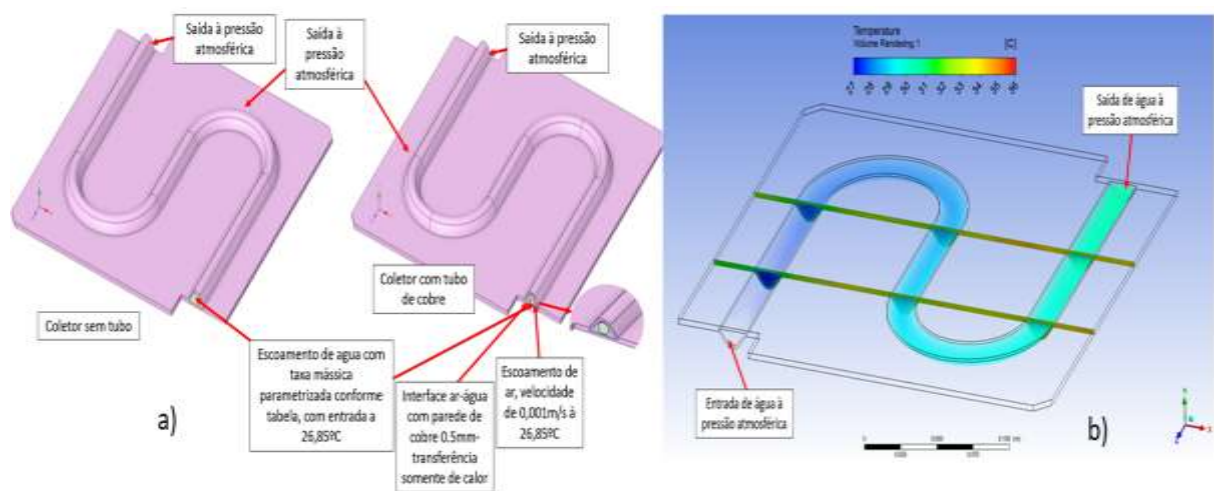
A correta determinação do ângulo de parede é fundamental para avaliar os limites de conformação e permite ajustes no processo visando redução do retorno elástico e melhoria da fidelidade geométrica [18]; [28]. Os resultados obtidos demonstraram boa concordância com os estudos de Teixeira [26], permanecendo dentro das tolerâncias esperadas e validando a confiabilidade do método e dos parâmetros utilizados.

3.3 EFICIÊNCIA TÉRMICA

A análise comparativa da eficiência térmica de coletores utilizando simulação numérica em ambiente ANSYS®. Considerou-se uma radiação solar incidente de 1.000 W/m² sobre uma área útil de $0,0784$ m², correspondente à dimensão da placa conformada. O estudo avaliou dois cenários: um canal com tubo de cobre interno e outro sem tubo, ambos submetidos às mesmas condições operacionais.

A Figura 09 ilustra a representação computacional dos dois coletores, destacando as diferenças construtivas e o escoamento da água. A entrada do fluido ocorre a 26,85°C, sob pressão atmosférica, e a simulação considera fluxo de ar e condução térmica na parede de cobre com espessura de 0,5 mm.

Figura 09: Representação do coletor solar: a) Sem e com tubo de cobre interno para passagem de água; b) Representação da temperatura da água na vazão do coletor solar.



Fonte: Do Autor

Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela 06, que apresenta os dados de vazão mássica, temperatura de saída, calor absorvido (Q_u) e eficiência térmica (%) para ambos os modelos. Observou-se que o canal sem tubo apresentou eficiência média superior (97,83%) em comparação ao modelo com tubo (39,61%). Além disso, à medida que a vazão aumenta, a temperatura de saída diminui em ambos os casos, porém o canal sem tubo demonstra maior absorção de calor.

Tabela 06 – Dados da simulação da eficiência térmica para diferentes vazões

Simulação	Taxa mássica (Canal s/tubo)	Taxa volumétrica	T_Saída (Canal s/tubo)	T_Saída (Canal c/tubo)	Q_u (Canal s/tubo)	Q_u (Canal c/tubo)	Eficiência a s/tubo	Eficiência a c/ tubo
-	kg/s	L/min	°C	°C	W	W	%	%
S1	0,005	0,30	30,56	28,52	74,48	31,82	95,00	40,59
S2	0,007	0,42	29,56	28,07	75,07	31,36	95,76	40,01
S3	0,009	0,54	29,03	27,83	76,44	31,08	97,51	39,65

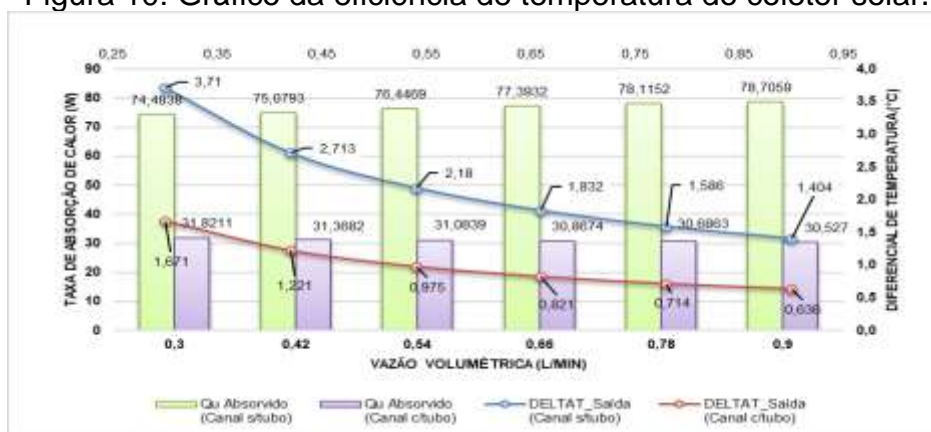


S4	0,011	0,66	28,68	27,67	77,39	30,86	98,72	39,37
S5	0,013	0,78	28,44	27,56	78,11	30,68	99,64	39,14
S6	0,015	0,90	28,25	27,49	78,70	30,52	100,39	38,94
Média=	0,010	0,60	29,08	27,85	76,70	31,05	97,83	39,61

Fonte: Do Autor

A Figura 10 mostra graficamente a relação entre vazão volumétrica, calor absorvido (Q_u) e variação de temperatura (ΔT). Verifica-se que, no canal sem tubo, o calor absorvido aumentou de 74,48 W para 78,71 W, enquanto no canal com tubo reduziu-se de 31,82 W para 30,53 W. A variação de temperatura (ΔT) também foi mais expressiva no canal sem tubo, embora com maior perda térmica, sugerindo eficiência superior em termos de absorção, mas com menor retenção de calor.

Figura 10: Gráfico da eficiência de temperatura do coletor solar.



Fonte: Do autor.

Esses resultados evidenciam que o design do canal estampado diretamente na chapa proporciona maior área de contato térmico e eficiência global superior.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o processo de estampagem incremental (SPIF), apresenta elevado potencial para conformação de geometrias complexas, sendo tecnicamente viável e compatível com aplicações como coletores solares térmicos. Os ensaios de tração evidenciaram comportamento típico de materiais dúcteis, com influência significativa da orientação da laminação nas propriedades mecânicas, fator relevante para processos de conformação.



A comparação entre os dados das Curvas Limite de Conformação (CLC) e das Linhas de Fratura (FLC) demonstrou que o processo SPIF permite ao material ultrapassar os limites convencionais de deformação sem comprometer sua integridade, devido à distribuição uniforme de tensões e menor concentração de esforços críticos. A análise da geometria em formatos de pirâmide e cone mostrou diferenças mínimas em φ_1 , com o cone apresentando maior deformação biaxial em φ_2 , o que indica que a geometria exerce influência sutil sobre o comportamento final.

A avaliação do ângulo de parede (Ψ) e da espessura final evidenciou que o incremento vertical (Δz) e a geometria da peça afetam diretamente a profundidade de conformação, o retorno elástico e a precisão dimensional. Menores incrementos favoreceram o aumento do retorno elástico, enquanto maiores incrementos garantiram maior estabilidade geométrica.

A montagem dos coletores solares demonstrou eficiência estrutural, sendo possível garantir vedação e resistência mecânica com o uso de rebites e silicone poliuretano. A substituição do tubo de cobre por canais conformados diretamente na chapa simplificou a construção, reduziu custos e possibilitou produção em escala reduzida com maior flexibilidade.

A simulação numérica da eficiência térmica, utilizando o software ANSYS®, revelou que os coletores sem tubo de cobre apresentaram maior eficiência térmica média (97,83%), devido à maior área de contato entre o fluido e a superfície absorvedora, embora com maior perda térmica. Já os modelos com tubo, apesar de menor absorção de calor, demonstraram melhor retenção térmica, resultado do isolamento entre os materiais.

Portanto, os resultados comprovam a viabilidade técnica, térmica e econômica da estampagem incremental na fabricação de coletores solares, contribuindo para o desenvolvimento de soluções sustentáveis, leves e de baixo custo para o setor de energia térmica renovável.

REFERÊNCIAS

- [1] ALLWOOD J. M., BRAUN D., MUSIC O. **The effect of partially cut-out blanks on geometric accuracy in incremental sheet forming**, Journal of Materials Processing Technology, vol. 210, pp. 1501-1510, 2010.



- [2] MOTTA, L.E.C., DALEFFE, A., CONGER, R., MARCH D.M., CATELAN, J., FRITZEN, D., **Estampagem Incremental Múltiplos Estágios em Chapas de Aço 1008**, Revista Vincci – Periódico Científico da UniSATC, v. 8, n. 2, p. 386-405, jul./dez., 2023.
- [3] MARCH, D.G., PINHEIRO, W. C., FRITZEN, D., DALEFFE, A., CASTELAN, J., **Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapas de Alumínio para uso em Aquecedores Solares**, Revista Vincci – Periódico Científico da UniSATC, v. 8, n. 2, p. 446-468, jul./dez., 2023.
- [4] LU H., LIU H., WANG C., **Review on strategies for geometric accuracy improvement in incremental sheet forming**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology , vol. 102, p. 3381–3417, 2019.
- [5] JOVANI C., SCHAEFFER L., DALEFFE A., FRITZEN D., SALVARO V., SILVA F. P. d., **Manufacture of custom-made cranial implants from DICOM® images using 3D printing, CAD/CAM technology and incremental sheet forming**. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, 2014.
- [6] DALEFFE A. *Fabricação de Próteses Cranianas Personalizadas em Chapas de Titânio através da Estampagem Incremental*. Trabalho de tese do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais PPG3M UFRGS. Porto Alegre 2014.
- [7] ARRUDA R. P. D., BARONI A., SCHAEFFER L., *Sheet metal forming: new technologies applied to the fabrication of solar energy collector panels*, International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, vol. 1 N°2/3, 2008.
- [8] ALUMÍNIO R., **Especial Mineração de Bauxita: como é feita a extração e qual a importância da atividade para o Brasil**, 30 setembro 2019. [Online]. Available: <https://revistaaluminio.com.br/especial-mineracao-de-bauxita-como-e-feita-a-extracao-e-qual-a-importancia-da-atividade-para-o-brasil/>. [Acesso em 05 01 2024].
- [9] CBA, **Laminados de alumínio**, São Paulo: Votorantim, 2002.
- [10] LIMA J. P. P., **Estudo do comportamento mecânico da liga de alumínio ASTM/ABNT 1200 em função das condições de solitação mecânica**, Trabalho de Conclusão de Curso, p. 50, 2016.
- [11] PEREIRA R. C., SHIOTA R. T. S., MELLO S. F. M., ASSIS V. J., J. R. BARTOLI, **Eficiência térmica de coletores solares de baixo custo - csbc**, Novembro 2006.
- [12] INPE I. N. d. P. E., **Atlas brasileiro de energia solar**, 2.ed ed., São José dos Campos - SP, 2017.
- [13] DUFFIE J. A., BECKMAN W. A., **Solar Engineering**, 4th Edition. ed., I. H. N. J. John Wiley & Sons, Ed., 2013.



[14] TAVARES L. D. O., DIMBARRE V. V., BIGLIA F. M., CRUZ F. B. C., SANTOS P. H. D. D., ALVES T. A., **Análise Experimental do Desempenho Térmico de um Coletor Solar do Tipo Placa Plana**, vol. 13º, Conbrepro - Congresso brasileiro de Engenharia de Produção, 2023.

[15] COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION INC. **Solar Systems Use Copper to Harness Sun's Energy**. Building & Architecture News, 2010. Disponível em: <https://www.copper.org/publications/newsletters/ba-news/2010/december/article4.html?utm>. Acessado em: Julho de 2025.

[16] GREENER, T. S., **Energias renováveis no brasil e no mundo**, vol. 001, E-Book, 2018.

[17] PACHECO, F., **Energias Renováveis: breves conjuntura e planejamento**, Salvador p 4-11 outubro de 2006.

[18] FRITZEN, D., **Estudo dos Parâmetros de Conformabilidade para o Processo de Estampagem Incremental**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

[19] TEIXEIRA, A. R., **Análise de Parâmetros de Estampagem Incremental para Alumínio Puro**. Porto Alegre: UFGS- Universidade Federal de Rio Grande de Sul, 2019.

[20] DONATO, G. H. B., MOÇO, R. F., **Caracterização de Resistência à Fadiga de Aço Sae 1008 e Alumínio 1200 H14 Utilizando Flexão Alternada com Corpos de Prova Normalizados e Propostos**. 71º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 16º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week. Rio de Janeiro, setembro de 2016.

[21] RODRIGUES, G. L., **Efeitos dos Tratamentos Térmicos em Ligas De Alumínio**. Monografia de Bacharel em Engenharia Mecânica. Universidade de Rio Verde, Goiás 2015.

[21] CARDOSO, D. N., **Efeito do Ciclo Térmico no Encruamento de Ligas Metálicas com Características Estruturais Distintas**. Bacharel em Engenharia de Materiais. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2019.

[22] LIMA, J. P. P., **Estudo do Comportamento Mecânico da Liga de Alumínio Astm/Abnt 1200 em Função das Condições de Solicitação Mecânica**, Belo Horizonte MG, 2016.

[23] BARROS V. H. D. S., **Fabricação de Peças Complexas em Chapas Finas de Alumínio Comercialmente puro usando o Método de Estampagem Incremental**, Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2019.



- [24] SCHREIBER, R. G., **Método de Determinação do Limite de Deformação na Estampagem Incremental de Diferentes Materiais**, Porto Alegre: UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022.
- [25] PARK J. J., KIM Y.-H., **Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique**, pp. 447-453, 2003
- [26] TEIXEIRA, A. R., **Análise de Parâmetros de Estampagem Incremental para Alumínio Puro**, Porto Alegre: UFRGS- Universidade Federal de Rio Grande de Sul, 2019.
- [27] YAMAUCHI C. C., **Estudo da Influência do Tratamento Térmico Prévio na Estampagem Incremental de Chapas de Alumínio AA7475**, Universidade Estadual de Campinas, 2019
- [28] ALLWOOD J., HOUGHTON N., JACKSON K., **The design of an incremental forming machine**, Proceedings of the 11th Conference on Sheet Metal, pp. 471-478, 2005
- [29] ABNT.NBR-6152, **Materiais metálicos – Ensaio de tração à temperatura ambiente**. ABNT, Rio de Janeiro, 2002.