

PROVA DE CONCEITO DE UMA SOLUÇÃO CONTROLE PARA A TEMPERATURA DE INTERPASSE DURANTE O PROCESSAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO POR WAAM COM RESFRIAMENTO ATIVO POR QUASE-IMERSÃO

Congresso Brasileiro De Manufatura Aditiva, 1ª edição, de 30/11/2020 a 01/12/2020
ISBN dos Anais: 978-65-86861-62-4

ASSIS; Ricardo Henrique da Silva¹, **SILVA; Leandro João da**², **REIS; Ruham Pablo**³, **ASSIS; Pedro Augusto Queiroz de**⁴

RESUMO

1- Introdução

Dentre as diferentes formas para realização de manufatura aditiva de componentes metálicos, os processos baseados na deposição a arco (WAAM - *Wire + Arc Additive Manufacturing*) se destacam principalmente pela sua elevada taxa de deposição (entre 1 a 5 kg/h) [1]. Porém, elevadas taxas de deposição são acompanhadas por elevados aportes térmicos, que sem uma técnica de gerenciamento térmico adequada podem levar ao acúmulo de calor. O fenômeno de acúmulo de calor é caracterizado pelo aumento contínuo da temperatura do componente durante a sua fabricação. Num caso extremo, pode levar ao colapso do componente, mas antes disso pode ocorrer desvio geométrico, oxidação excessiva e problemas metalúrgicos [2]. Diferentes estratégias para reduzir o acúmulo de calor foram propostas na literatura [3, 4, 5]. Em particular, o Resfriamento Ativo por Quase-Imersão (RAQI), apresentado por Silva et al. (2020) [3], tem um bom desempenho em termos de eficiência e manutenção da produtividade. Cabe salientar que o RAQI foi desenvolvido na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia ao longo de um trabalho de doutorado (patente depositada sob o registro BR10201801-53145 [6]).

Em um sistema de manufatura aditiva com RAQI, a pré-forma é depositada em uma cuba na qual o nível de água (ou outro líquido de resfriamento) é mantido a uma distância fixa do topo da pré-forma. Desse modo, tem-se uma redução significativa do acúmulo de calor (quanto mais próximo o nível de água da camada de deposição, maior será o arrefecimento). Contudo, é necessário manter uma distância mínima para não desestabilizar o processo e comprometer a qualidade da peça em termos de geometria e propriedades mecânicas. Em Silva et al. (2020) [3], isso é realizado por meio de uma combinação entre chave boia e válvula solenoide.

Do ponto de vista da teoria de controle [7], o RAQI, como concebido em sua prova de conceito, opera em malha aberta (MA), uma vez que a saída de interesse, temperatura de interpasse (T_i) (isto é, temperatura da solda entre os passes de solda), não é utilizada na determinação do fluxo de água que entra na cuba. Uma possibilidade para melhorar o desempenho do RAQI consiste na adoção de um sistema de controle em malha fechada. Mais especificamente, na implementação de um controlador para fazer com que a T_i siga referências fornecidas por um operador. Isso poderia uniformizar as propriedades mecânicas da peça produzida e a geometria, já que essas características são definidas pelo histórico térmico vivenciado pela peça durante a produção.

O projeto de um sistema de controle tipicamente envolve a caracterização da planta, a escolha da lei de controle e o ajuste dos parâmetros do controlador [7]. Após concluídas essas etapas, o desempenho do sistema é avaliado por meio de simulações e/ou ensaios experimentais. É possível que sejam necessárias iterações entre o ajuste paramétrico e os testes no equipamento [8]. No caso da WAAM tais testes podem demandar um elevado dispêndio de tempo e dinheiro, a depender da geometria da peça fabricada.

Para reduzir o custo de projeto do controlador, optou-se por desenvolver um protótipo com características similares ao sistema real. Nesse processo, os principais componentes do sistema de RAQI foram mantidos: Cuba de deposição, elementos para circulação de água e sensor de temperatura. Mais ainda, a tocha de deposição, ou seja, o arco elétrico, do sistema de manufatura aditiva foi substituída por uma resistência elétrica. Uma chapa de alumínio foi fixada junto à resistência para representar a pré-forma. Então, alterando o nível de água no tanque em que a resistência foi fixada, tem-se uma variação da temperatura na chapa de alumínio. Esse efeito é

¹ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ricardohenriqueassis@ufu.br

² Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, leandro.js@ufu.br

³ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ruhamreis@ufu.br

⁴ Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, pedro.assis@ufu.br

similar à relação entre nível de água na cuba e temperatura da pré-forma no sistema real.

Projetou-se um controlador para fazer com que a temperatura da chapa seguisse valores de referência. Em particular, adotou-se um controlador proporcional-integral (PI) devido à simplicidade de implementação e projeto. Os parâmetros do controlador foram ajustados com base no conhecido método da resposta ao degrau [9].

Assim, pela delimitação do sistema real, pela construção de um protótipo simplificado, projeto e implementação de lei de controle para temperatura, esse trabalho tem como objetivo provar o conceito de uma solução de controle para a temperatura de interpasse durante o processamento de ligas de alumínio por WAAM com resfriamento ativo por quase-imersão.

2- Metodologia

2.1 - Descrição do sistema

Um diagrama esquemático de um sistema de manufatura aditiva com RAQI é mostrado na Figura 1 [3]. Na sequência são descritos os principais elementos e as respectivas finalidades do processo. A deposição de material é realizada dentro de uma cuba de construção (item C) por meio do conjunto tocha e fonte de energia (itens G e L). As camadas já depositadas (item A) são submersas em um fluido de resfriamento (item B). O sistema de bombeamento e filtragem (item I) é responsável pela entrada e saída deste líquido na cuba. Tal sistema mantém uma distância fixa H entre fluido e camada de deposição. Isso é realizado para que o processo não seja prejudicado pelo líquido. A leitura da T_i é realizada pelo sensor de temperatura (item J). O procedimento é controlado pelo computador (item K).

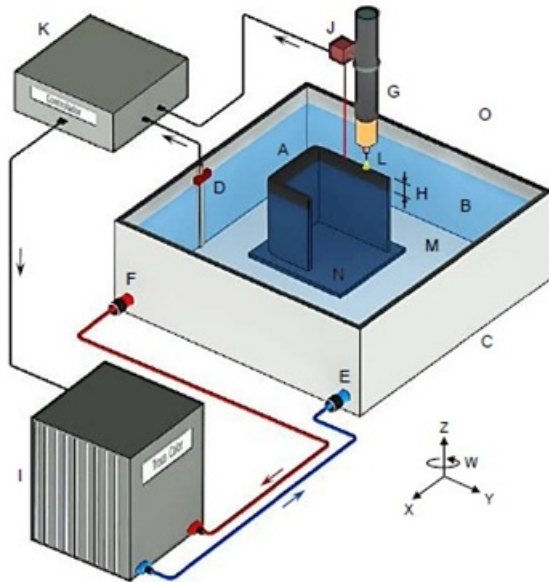


Figura 1: Esquema do sistema de RAQI desenvolvido no LAPROSOLDA/FEMEC [3].

Para diminuir os custos de desenvolvimento do controlador de temperatura destinado ao RAQI e avaliar os desafios na realização desse controle, construiu-se o protótipo ilustrado na Figura 2. Em particular, o conjunto tocha e fonte de deposição, que fornece calor à pré-forma, foi substituído por uma resistência elétrica acoplada a uma chapa de alumínio (item A). Esse conjunto foi posicionado no interior do Tanque B, que representa a cuba de construção. O sistema de bombeamento é constituído pelos Tanques C e F, bomba hidráulica (item G) e mangueiras de conexão. Foi instalada uma válvula manual (item E), para controlar o fluxo de água entre os Tanques C e F.

¹ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ricardohenriqueassis@ufu.br

² Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, leandro.js@ufu.br

³ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ruhamreis@ufu.br

⁴ Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, pedro.assis@ufu.br

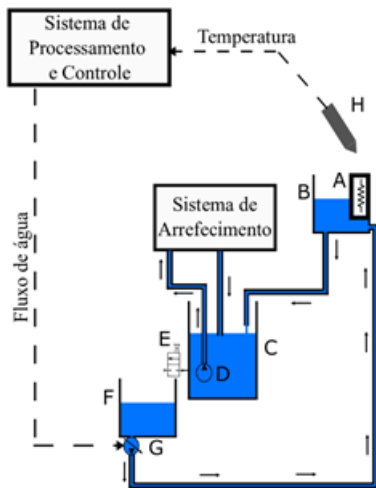


Figura 2: Esquema do protótipo desenvolvido.

Utilizando a bomba hidráulica (item D) circula-se a água em um sistema de arrefecimento. Mais especificamente, um conjunto de cinco serpentinas acopladas a células de efeito Peltier é empregado para resfriar a água do circuito. Cabe salientar, que no sistema real, não há necessidade de resfriamento, pois o volume total de água usado é grande o suficiente para que não fosse perdida a capacidade de arrefecimento. Contudo, no protótipo essa perda rapidamente ocorria na ausência do sistema de resfriamento.

Assim como no processo real, a temperatura é medida utilizando um pirômetro (item H). O sistema de processamento e controle é composto por Arduino Uno e uma ponte H (L298N), possibilitando controlar o fluxo de água entre os Tanques F e B.

2.2 - Projeto da lei de controle

A tarefa de controle consiste em fazer com que a temperatura T da chapa de alumínio siga uma referência T_{ref} . Com esse propósito, o fluxo de água do Tanque F para o B pode ser controlado alterando-se a entrada da planta. Mais especificamente, ciclo ativo entre 0 e 100% de um sinal PWM. Essa porcentagem será doravante denotada por u . É importante notar que o retorno de água do Tanque B para o C não é controlado.

Para realizar o rastreamento da referência, adotou-se um controlador proporcional-integral (PI). A estrutura de controle é mostrada na Figura 3.

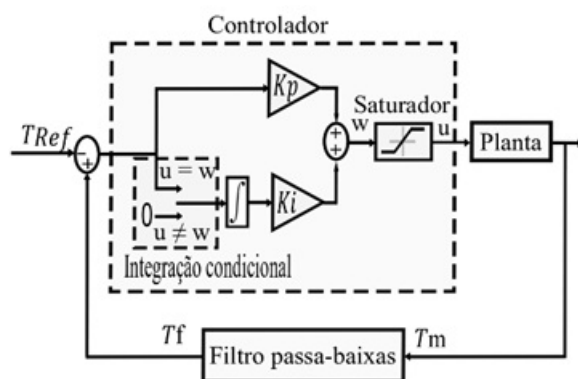


Figura 3: Diagrama de blocos do controlador.

Devido à utilização da ação integral, é possível que ocorra *windup*. Como explicado em Åström e Hägglund (1995) [9], quando ocorre a saturação pode-se interpretar que o sistema opera em malha aberta, pois o atuador permanece com a mesma ação de controle independentemente da saída. Porém, o erro continua sendo integrado e conseqüentemente, o termo integral atinge valores elevados. Para que a ação integral assumira valores próximos do regime estacionário, o erro deve assumir um sinal diferente do inicial por intervalos longos de tempo. Como resultado, têm-se

¹ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ricardohenriqueassis@ufu.br

² Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, leandro.js@ufu.br

³ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ruhamreis@ufu.br

⁴ Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, pedro.assis@ufu.br

sobressinais e tempos de acomodação elevados. Para solucionar esse problema, foram testadas algumas técnicas de anti-windup, como *back-calculation* e integração condicional. Neste trabalho, essa última mostrou melhores resultados e foi adotada. A ideia fundamental da integração condicional consistiu em desligar a ação integral quando a ação de controle satura. A detecção da saturação é realizada comparando-se a ação de controle calculada w e a entrada real do sistema u .

Vale comentar que, para reduzir o efeito de ruído de medida, foi implementado um filtro passa-baixas com frequência de corte de 0,25 Hz. Uma comparação entre as temperaturas medida e a filtrada, denotadas respectivamente por T_m e T_f , pode ser encontrada na Figura 4.

2.2.1 - Ajuste dos parâmetros do controlador a partir da resposta ao degrau

O projeto do controlador foi realizado utilizando o método da resposta ao degrau de Ziegler e Nichols, descrito em Aström e Hägglund (1995) [9]. Nesse método aplica-se um degrau na entrada da planta e avalia-se o comportamento da saída. Os resultados desse ensaio são mostrados na Figura 4.

Vale comentar que a parte inferior da resistência elétrica deve permanecer submersa em água para evitar um superaquecimento. Isso está associado a um ciclo ativo u mínimo de 46,50%. Mais ainda, para que a água não transborde no Tanque 2, a ação de controle foi limitada superiormente em 57,00 %. Também cabe salientar que, em todos os testes realizados, a tensão fornecida à resistência e o fluxo de recirculação de água são mantidos constantes.

A partir da Figura 4, é possível identificar o ganho K , o atraso L e a constante de tempo τ da resposta, ilustrados na Figura 5. Em particular, determinaram-se $K = -12,09$, $L = 35$ e $\tau = 502$. Cabe notar que tem-se um valor de K negativo. Por isso, adotou-se uma realimentação positiva (vide Figura 3). Então, o ganho K_p e o tempo integral T_i foram ajustados conforme a Tabela 1, obtendo-se $K_p = 1,0677$ e $T_i = 116,7$.

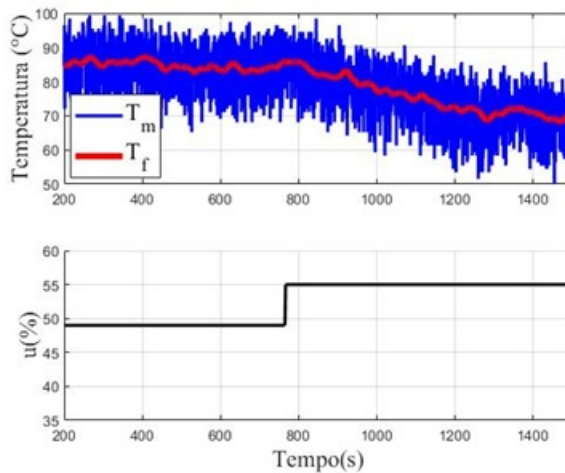


Figura 4: Curva da Resposta ao degrau.

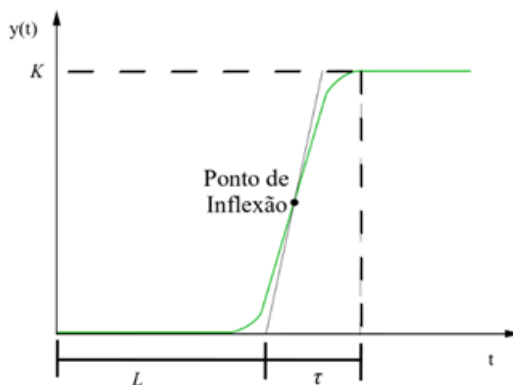


Figura 5: Caracterização da resposta ao degrau no método de ajuste de Ziegler e Nichols [9].

¹ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ricardohenriqueassis@ufu.br

² Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, leandro.js@ufu.br

³ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ruhamreis@ufu.br

⁴ Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, pedro.assis@ufu.br

Tabela 1: Parâmetros do controlador PID obtidos com o método da resposta ao degrau de Ziegler e Nichols. Åström e Hägglund (1995) [9].

Tipo de

Controlador

K_p

T_I

T_d

P

$T/(KL)$

∞

0

PI

$0,9T/(KL)$

$L/0,3$

0

PID

$1,2T/(KL)$

$2L$

$0,5L$

3 - Resultados

Foram realizadas validações experimentais do sistema de controle proposto assumindo-se uma faixa de trabalho entre 60 °C e 85 °C. Para validação do controlador projetado na seção 2.2, inicialmente mantém-se $u = 46,5\%$ até a temperatura da chapa de alumínio convergir para aproximadamente 82 °C (temperatura na qual o controlador foi ajustado). Então o controlador é ligado para rastrear referências de temperatura em torno do valor inicial.

A Figura 6 apresenta resultado do ensaio com os parâmetros calculados pelo método de ajuste de Ziegler e Nichols [9]. Pode-se verificar que a temperatura da peça foi guiada para o entorno da referência. As oscilações existentes podem ser atribuídas a fatores externos ao processo, como a abertura e o fechamento da válvula manual e ao ruído de medida.

¹ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ricardohenriqueassis@ufu.br

² Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, leandro.js@ufu.br

³ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ruhamreis@ufu.br

⁴ Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, pedro.assis@ufu.br

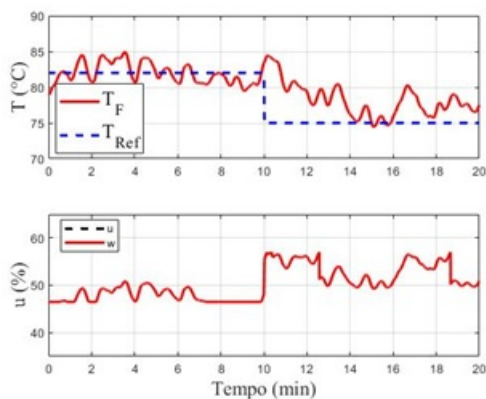


Figura 6: Teste do controlador projetado pelo método de ajuste de Ziegler e Nichols [9].

Para melhorar o desempenho do sistema, reajustaram-se K_p e T_i experimentalmente. Os valores finais obtidos foram $K_p = 3,044e$ e $T_i = 104,493$. Os resultados com esses parâmetros encontram-se na Figura 7. Pode-se notar que a velocidade de convergência aumentou e o erro em regime diminuiu.

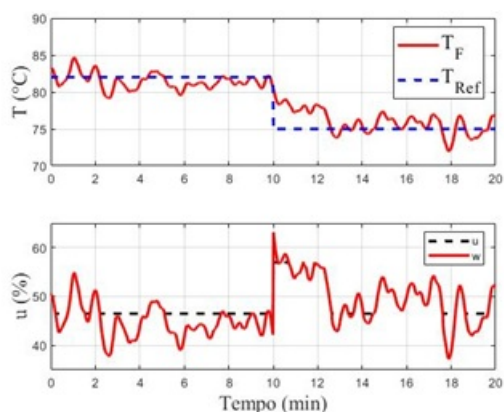


Figura 7: Teste do controlador com os parâmetros refinados experimentalmente.

Na Figura 8 são mostrados dois resultados de testes com o controlador final com a chapa inicialmente em temperatura ambiente. Isto é, ligou-se o controlador no momento em que a chapa começou a ser aquecida. Verifica-se que, após cerca de 8 minutos, a saída é mantida em torno da referência até por volta de 15 minutos. Então, a temperatura da chapa de alumínio aumenta. Isso ocorre porque a temperatura da água aumenta ao longo do ensaio uma vez que o sistema de arrefecimento não consegue retirar todo o calor introduzido pela resistência. Esse problema poderia ser resolvido aumentando a capacidade de arrefecimento, por exemplo, introduzindo-se mais células Peltier. Contudo, como o aquecimento da água não é observado no processo real, isso não foi realizado no presente trabalho.

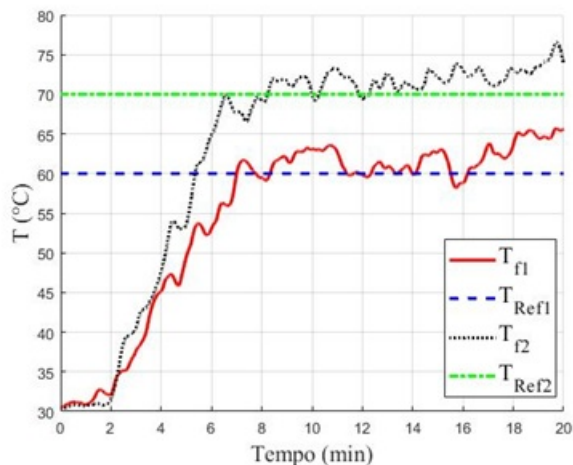


Figura 8: Teste para constatar o aquecimento da água do sistema.

¹ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ricardohenriqueassis@ufu.br
² Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, leandro.js@ufu.br
³ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ruhamreis@ufu.br
⁴ Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, pedro.assis@ufu.br

4 - Conclusão

Com o objetivo de provar o conceito de uma solução de controle para a temperatura de interpasse durante o processamento de ligas de alumínio por WAAM com RAQI foi desenvolvido um protótipo para simular o comportamento do processo real. A partir da implementação de um controle PI neste protótipo, foi possível guiar a temperatura da chapa de alumínio, que representa a temperatura de interpasse, para o entorno dos valores de referência. Isso indica que um controlador similar pode ser empregado no sistema de WAAM com RAQI.

Foram observadas oscilações na temperatura que podem ser atribuídas à fatores externos ao processo, como o ruído de medida e a regulação do nível de água no tanque por meio de válvula manual. Tais oscilações podem ser reduzidas por meio de um controle automático de nível de água nos Tanques. Para isso, faz-se necessário inserir sensores de nível no processo. Mais ainda, a informação do nível de água no tanque possibilitaria aumentar a faixa de excursão para a entrada de controle. Contudo, como no processo real não existiam sensores de nível no período em que foi desenvolvido o protótipo, tal estratégia não foi adotada nesse trabalho.

Trabalhos futuros podem investigar as vantagens da inserção de sensores de nível no sistema. Pode-se também estudar o efeito do controle de temperatura em materiais com diferentes difusividades térmicas, como aço. Além disso, a malha de controle proposta pode ser empregada no sistema real para controle da temperatura de interpasse. Isso pode trazer vantagens na fabricação de peças, por exemplo, em termos de propriedades mecânicas e geometria resultantes na deposição de diferentes tipos de metais.

5 - Referências

- [1] WILLIAMS, S. W.; M. F., A. A. C., D. J., P. G., and C. P., "Wire + arc additive manufacturing," *Materials Science and Technology*, vol. 32, no. 7, pp. 641-647, 2016.
- [2] YANG, D.; WANG, G.; and ZHANG, G., "Thermal analysis for single-pass multi-layer gmaw based additive manufacturing using infrared thermography," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 244, pp. 215-224, 2017.
- [3] Silva, L.J., Souza, D.M., de Araújo, D.B. et al. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *Int J Adv Manuf Technol* 107, 2513-2523 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05201-4>
- [4] LEI, Y.; XIONG, J.; and LI, R., "Effect of inter layer idle time on thermal behavior for multilayer single-pass thin-walled parts in gmaw-based additive manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, no. 1-4, pp. 1355-1365, 2018.
- [5] LU, X.; ZHOU, Y. F.; X. L. XING.; SHAO, L. Y.; XANG, Q. X.; and GAO, S. Y.; "Open-source wire and arc additive manufacturing system: Formability, microstructures, and mechanical properties," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 93, no. 5-8, pp. 2145-2154, 2017.
- [6] REIS, R. P.; SCOTTI, A.; e SILVA, L. J., Técnica de resfriamento ativo para manufatura aditiva. Patente Pendente, BR1020180153145: Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2018.
- [7] OGATA, K., **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Prentice Hall, 4 ed., 2003.
- [8] SKOGESTAD, Sigurd; POSTLE-THWAITE, Ian. **Multivariable feedback control: analysis and design**. New York: Wiley, 2007.
- [9] ÅSTRÖM, Karl J.; HÄNGGLUND, Tore. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2. ed. [s.i.]: Isa, 1995.

PALAVRAS-CHAVE: Controle da temperatura de interpasse, resfriamento ativo por

¹ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ricardohenriqueassis@ufu.br

² Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, leandro.js@ufu.br

³ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ruhamreis@ufu.br

⁴ Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, pedro.assis@ufu.br

quase-imersão, prova de conceito.

¹ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ricardohenriqueassis@ufu.br
² Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, leandro.js@ufu.br
³ Universidade Federal de Uberlândia - UFU, ruhamreis@ufu.br
⁴ Faculdade de Engenharia Mecânica - FEMEC, pedro.assis@ufu.br