

Modelamento do da estampabilidade de estruturas lamelares latão - cobre obtidas por junção por laminação acumulada .

Programa de trabalho C

Bolsista de mestrado a ser selecionado pelo PPGEMec - UFSCar

Professor orientador supervisor Andrea Madeira Kliauga

Professores colaboradores : Prof. Dr. Sergio Enrique Evangelista , Prof. Dr. José Benaque Rubert , Prof. Dr. Danielle Cristina Camilo Magalhães, Prof. Dr. Luciana Montanaro, Prof. Dr. Yusheng Liu

1. Introdução

Segundo Ghalehbandi et al. (2019) são poucos os trabalhos de simulação numérica dedicados à previsão do comportamento mecânico dos materiais produzidos por laminação acumulada (Accumulated Roll Bonding - ARB). Segundo esses autores os parâmetros que controlam as propriedades dos materiais multicamadas heteroestruturados (MH) são: (a) propriedades dos materiais envolvidos; (b) condições superficiais como limpeza e rugosidade que afetam a qualidade da união entre camadas e a resistência mecânica do compósito final; (c) parâmetros do processo de laminação tais como redução percentual de espessura, temperatura associada ao processo de laminação, velocidade angular do rolo laminador, condições de atrito entre camadas e da camada limítrofe com o rolo laminador, número de camadas, presença ou não de partículas de reforço entre camadas, tratamento térmico posterior à laminação completa. Além disto, eles enfatizaram os modelos deveriam prever as interrelações entre vários destes parâmetros citados e a evolução da textura cristalográfica por meio dos efeitos recristalização estática e dinâmica, nucleação e crescimento de grãos com possível redução da resistência mecânica e os efeitos de interface associados com a espessura da camada de difusão e com a resistência ao cisalhamento, dentre outros aspectos.

Um dos problemas relevantes na implementação do modelo de EF surge em função do padrão de discretização (no caso, pela quantidade de elementos de malha necessários para a simulação), o problema se acentua a cada camada adicionada na análise, além disso, há distorção geométrica excessiva da malha frente às condições do processo físico de laminação, isso demanda novas estratégias de modelagem.

Khan et al. (2021) enfatizaram a importância da temperatura dos materiais submetidos ao processo de laminação para pontuar sua influência marcante sobre a robustez da ligação entre camadas. Tal como em Ghalehbandi et al. (2019), Khan et al. (2021) atentaram para a complexidade dos mecanismos baseados nas teorias de filme, de energia de ativação, ligação por difusão metálica e recristalização da junção, cuja ocorrência é suscetível à temperatura de processo.

De Godoi et al. (2020) mostraram que boa parte do cisalhamento induzido durante a junção vêm da diferença de limites elásticos dos dois materiais do MHs. Além disso, o atrito entre material e rolos de laminação tem contribuição importante na distribuição do cisalhamento entre camadas e da componente de rotação ("spin") induzida por esse cisalhamento. A textura final e conseqüentemente a anisotropia plástica são conseqüências dessa heterogeneidade de distribuição da deformação.

A redução percentual de espessura correlaciona-se à resistência mecânica da ligação entre as camadas. A rotação do rolo pode influenciar no desempenho das interfaces, da microestrutura e da resistência mecânica global do compósito. Os tratamentos térmicos podem ser impostos de forma prévia, no decorrer e entre as operações de laminação e também como uma etapa de encerramento dos processos. Estas informações fazem referências a algumas das possíveis características ou condições de implementação por EF. Entretanto, os autores pontuaram que são críticas as

condições do fluxo de material e da deformação plástica severa imposta nos passes, o que pode comprometer as análises numéricas baseadas em malhas de elementos. Para o futuro, são sugeridos métodos envolvendo abordagem Euleriana segundo princípios usados em fluido-dinâmica ou métodos sem malha “meshless” baseado em partículas para flagrar as modificações complexas de ordem metalúrgica que ocorrem no processamento. Essa última abordagem se aproxima da metodologia experimental aplicada na análise por correlação de imagem, técnica que será incorporada no projeto.

2. Programa de Trabalho

O programa de trabalho se baseia nos estudos iniciais por elementos finitos (EF) já realizados no âmbito do Projeto Universal CNPq 403371/2023-6. Além disso, esse programa terá suporte experimental do projeto de mestrado B intitulado "Estudo e modelamento do encruamento de estruturas lamelares latão - cobre" para obter as equações constitutivas experimentais. O programa de trabalho para esse estudo paralelo também foi encaminhado nessa proposta de projeto de pesquisa.

Para o modelamento será utilizada a versão disponível do Abaqus na UFSCar. São previstos três contextos:

- Contexto FEA 1: Análises por Elementos Finitos do problema da laminação de compósitos ARB, com intuito de se prever aspectos macroscópicos do processo de empilhamento tais como cálculos de tensões, deformações, deslocamentos, cargas desenvolvidas e outros; será utilizada a modelagem simplificada no plano (2D) para o problema da laminação acumulativa.
- Contexto FEA 2: Estudar o comportamento do MH em diferentes estados de tensão a partir da descrição da solução realizada em modelo de casca para os ensaios Nakajima
- Contexto FEA 3. Estudo das interações entre as camadas durante a sollicitação mecânica

2.1 Resultados esperados para o Contexto 1

Ensaio de tração com temperatura e taxa variados para os dois materiais de partida, levantamento do equacionamento do tipo Johnson-Cook para os dois materiais.

Simulação em configuração 2D do processo de junção por laminação acumulada assumindo estado plano de deformação e variando o número de camadas Cu- Latão com os seguintes objetivos:

- previsão de estados de tensão-deformação das chapas feitas em compósitos ARB;
- previsão de outros valores, por exemplos entender melhor os desvios entre as curvas limites de conformação (CLC) experimentais e teóricas para os problemas do teste Nakajima. A Figura 1 mostra uma solução aplicada à junção de ligas de alumínio 1050 -7050

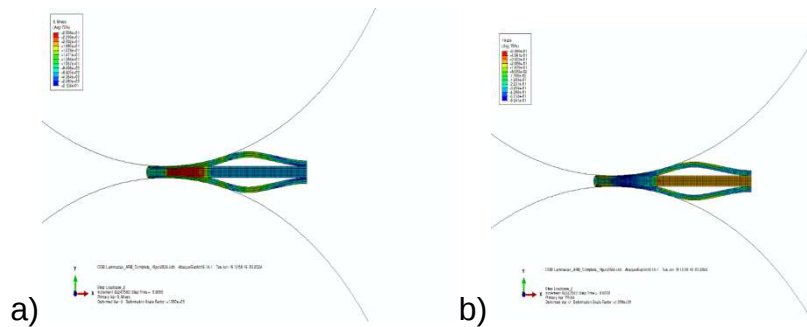


Figura 1: Representação gráfica pelo modelo EF da distribuição das tensões de von Mises (a) e da triaxialidade (b) – processo intermediário de laminação com 4 chapas de 1 mm de espessura, sendo as internas em Alumínio 7050 e as externas em Alumínio 1050 – relações constitutivas de ambos para a temperatura de trabalho de 450°C.

No exemplo acima foi atribuída a condição de “rígido para o rolo laminador”. Cada chapa foi modelada como elemento casca, sendo respeitadas as particularidades de análises de estado plano de deformações. Para cada chapa, foram especificadas 3 camadas de elementos na espessura. A mesma metodologia será aplicada aos pares Cobre- Latão.

2.2 Resultados esperados no contexto Contexto 2

Obtenção de MHs Cobre-Latão assim como descrito no programa de trabalho B. Ensaaios de tração (curva tensão-deformação verdadeiras) e de parâmetros de anisotropia (parâmetros de Lankford, convertidos para parâmetros do modelo de anisotropia de Hill-1948) para os MHs. Os parâmetros do modelo de dano isotrópico, como premissa de modelagem simplificada, serão obtidos a partir das porções finais das curvas tensão-deformação dos ensaios de tração realizados

Utilizando modelo de análise de danos desenvolvido no projeto CNPq serão simuladas várias configurações geométricas de corpos de prova do ensaio Nakazima, com o objetivo de:

- previsão de estados de tensão-deformação dos corpos de prova;
- previsão de valores de deformações principais críticas para a curva de limite de conformação (CLC) a partir de modelo de dano isotrópico implementado no programa Abaqus.
- Para cada configuração de MHs serão projetados 5 casos de geometrias dos corpos de prova, enumerados como caso 1, 2, 3, 4 e 5. Como aspectos gerais da modelagem para os 5 casos, serão considerados:
 - Para a geometria: mesma geometria utilizada no estudo de junção de ligas de Alumínio 1050-7050;
 - Com os dados de ensaios de tração (curva tensão-deformação verdadeiras) e de parâmetros de anisotropia (parâmetros de Lankford, convertidos para parâmetros do modelo de anisotropia de Hill-1948), aplicando modelo de dano isotrópico, como premissa de modelagem simplificada, obter uma previsão para as curvas de conformabilidade dos MHs.
 - Malhas e condições de contorno/ carregamentos: o ensaio Nakazima para os 5 casos foi modelado em condições similares. Matriz, prensa-chapas e punção serão impostos como rígidos. O problema como um todo pode ser representado apenas com $\frac{1}{4}$ da geometria total, dadas as simetrias gerais. A análise numérica de cada caso foi composta de 2 “loadcases”: o primeiro para o movimento de “descida” do prensa-chapas para travamento da borda da chapa e, o segundo para atuação do punção. Para todas as peças será utilizado elemento do padrão “casca” conforme nomenclatura do Abaqus. À

chapa do corpo de prova foi imposta a espessura de 1mm, valor representativo dos corpos construídos nos experimentos prévios. A Figura 2 ilustra os resultados obtidos para o caso alumínio 1050-7050. Os demais parâmetros de interesse envolvem carga no prensa-chapas, velocidade do punção, coeficiente de atrito nos contatos, dentre outros.

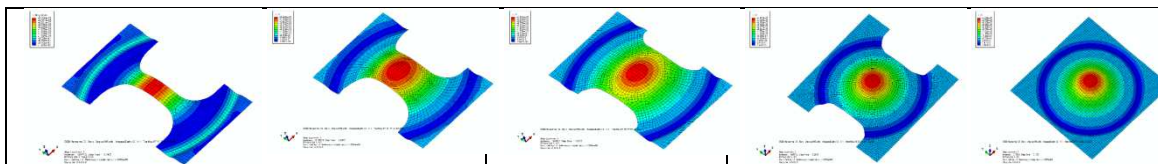


Figura 2. Exemplo de resultados esperados. Metodologia aplicada à junção de ligas de alumínio 1050-7050.

2. Resultados esperados no contexto Contexto 3

A partir das soluções do modelo de casca do contexto 2 é possível determinar os estados de tensão e níveis de deformação atingidos no ponto de ruptura do ensaio Nakajima. O próximo passo na simulação numérica é entender qual a interação entre as diferentes camadas durante o processo de conformação plástica. Pretende-se fazer uma análise exploratória.

Em colaboração com a universidade de Nanjing serão fabricadas amostras espessas de junção por difusão conforme descrito Zhang (2024). Uma presa mecânica associada a um forno de resistência inserido em um sistema de vácuo será utilizado para a união de placas Cobre-Latão. O controle de espessura de camada pode ser controlado por laminação adicional. O objetivo é o estudo da interação interfacial entre as camadas durante o ensaio de tração esquematizado na Figura 3 e acompanhamento da evolução das deformações localizadas por DIC.

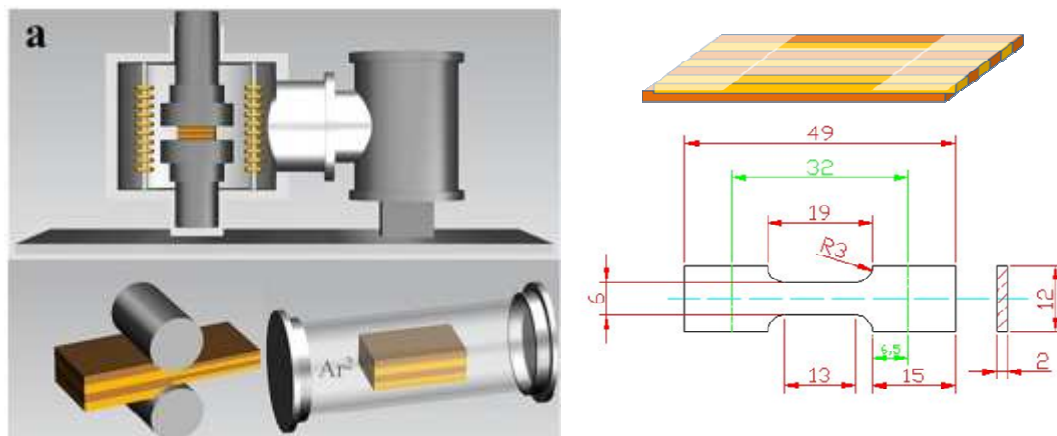


Figura 3. Configuração esquemática do sistema de junção por difusão e posicionamento da amostra de tração com relação à direção das lamelas cobre-latão.

O objetivo é variar a configuração do ensaio tração/flexão, obter evolução das deformações e estados de tensão por correlação de imagem e comparar esses resultados com os de simulação numérica.

Como objetivo a longo prazo espera-se poder aplicar esses resultados a um problema tridimensional com os estado de tensão do ensaio Nakajima.

3. Recursos Necessários e Plano de Trabalho

Solicita-se 1 Computador com especificações aproximadas a ser adquirido com a taxa de bancada. Clock de 3 GHz, 120GB RAM, disco SSD 1TB e monitor com 23" (este

equipamento deverá ser alocado no Laboratório de Mecânica Computacional do Depto. De Engenharia Mecânica da UFSCar e deverá ser utilizado pelo(a) estudante de pós-graduação para os trabalhos de análises por Elementos Finitos mapeados, a partir de licença do programa comercial Abaqus, disponível na UFSCar). Demais recursos para material e ensaios deverão vir do projeto de pesquisa regular ao qual essa proposta está vinculada.

4. Cronograma

A tabela 2 descreve o cronograma de trabalho

Tabela 1: Etapas do Plano de Trabalho e Cronograma no âmbito do Mestrado.

Etapa	Trim. 1	Trim. 2	Trim. 3	Trim. 4	Trim. 5	Trim. 6	Trim. 7	Trim. 8
1 - Cursar disciplinas PPG-EMec	X	X	X	X				
2 - Revisão da Literatura	X	X	X					
3 - Instalação e treinamento inicial com o Abaqus	X							
4 - Treinamentos – 3 modelos		X	X	X				
5. Ensaio de tração nos materiais de partida, modelamento das equações constitutivas do cobre e latão			x	x				
6 - Qualificação - Mestrado			X	X				
7 Ensaio de tração nos MHs e levantamento do coeficiente de Langford					x	x		
8 - Desenvolver modelos 1					X			
9 - Desenvolver modelos 2						X		
10- Ensaio mecânico de MHs obtidos por junção por difusão com sistema DIC						x	x	
11 - Desenvolver modelos 3						x	X	
12 - Escrita de trabalhos científicos				X	X	X	X	X
10 - Escrita da dissertação					X	X	X	
13 - Defesa da dissertação e correção final.								X

Para cada etapa do Plano de Trabalho e Cronograma há uma breve descrição a seguir:

1) Cursar disciplinas do Programa de Pós-graduação – PPG-EMec

2) Revisão da Literatura: para todos os modelos de Elementos Finitos, antecipa-se a necessidade de se obter:

- Uma classificação de diretrizes e parâmetros relacionados à implementação EF nos 3 grupos de modelos;
- determinação dos limites operacionais do Abaqus conforme licença da versão 6.14 e levantamento das possibilidades da versão mais atual e que poderia trazer impactos relevantes neste projeto;

3-4) Instalação e treinamento inicial com o software Abaqus: aquisição do computador e instalação do software Abaqus para treinamento inicial.

5,7,10) Ensaios mecânicos destinados a fornecer dados experimentais para o modelamento matemático.

8.9,11) Em específico, para grupo de modelo, têm-se:

Modelo 1: SPF

Revisão dos modelos FEA e ampliação do escopo

Modelo 2: Nakazima

- Revisão dos modelos FEA e ampliação do escopo;
- Modelos de dano implementados no Abaqus 6.14;

Modelo 3: Modelamento tridimensional em diferentes estados de tensão

- Revisão dos modelos FEA e ampliação do escopo

Referências Bibliográficas

Ghalehbandi, S. M., Malaki, M., & Gupta, M. (2019). Accumulative roll bonding-A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 17). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/app9173627>

de Godoi, R. P., Camilo Magalhães, D. C., Avalos, M., Bolmaro, R. E., Sordi, V. L., & Kliuga, A. M. (2020). Microstructure, texture and interface integrity in sheets processed by Asymmetric Accumulative Roll-Bonding. *Materials Science and Engineering: A*, 771. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138634>

Khan, H. A., Asim, K., Akram, F., Hameed, A., Khan, A., & Mansoor, B. (2021). Roll bonding processes: State-of-the-art and future perspectives. In *Metals* (Vol. 11, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/met11091344>

Q. Zhang, Y. Li, F. Liang, Z. Zhou, Yusheng Li, J. Rau, C. Greiner, Y. Zhao, Y. Zhu, X. Chen. (2024) Friction anisotropy and associated surface deformation mechanisms in heterogeneous copper/bronze laminates, *Materials Characterization*, 208 (2024)113644, <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113644>