cbecimat26
26° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais
22 a 26 de novembro de 2026
Costão do Santinho
Florianópolis-SC

Modelagem Numérica da Evolução do Grão Austenítico em Forjamento a Quente via Sub-rotinas Definidas pelo Usuário no Software QFORM UK 10.

Thiago Marques Ivaniski[1] · J. Epp[2] · Alexandre da Silva Rocha[1]
[1] Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Brasil
[2] Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT), Alemanha

Introdução

O tamanho de grão austenítico influencia as transformações de fase e o desempenho de aços bainíticos de resfriamento contínuo. Seu controle no forjamento pode contribuir para rotas que dispensam têmpera e revenimento.

A simulação por elementos finitos, associada a modelos metalúrgicos, permite relacionar as condições de deformação à recristalização dinâmica e ao refino de grão. Subrotinas em Lua ampliam o pós-processamento do QForm UK com variáveis microestruturais [1, 2].

Objetivos

Implementar uma subrotina em Lua no QForm UK 10 para prever a evolução da recristalização dinâmica e do tamanho de grão austenítico do aço DIN 18MnCrSiMo6-4.

Comparar as previsões numéricas usando modelo de Estrin-Mecking (evolução das discordâncias) com resultados experimentais de compressão a quente.

Metodologia

Compressão 3D viscoplástica a 1150 °C, com redução de 60% da altura, taxas de deformação de 0,1 e 5 s^{-1} e grão inicial de 45 µm.

$$\rho = (1-X)\rho_{wh} + X\bar{\rho}_{rex}$$

Fração recristalizada | Densidade de discordâncias na região não recristalizada (encruamento) | Densidade média de discordâncias na região recristalizada (amaciamento)

ρ: densidade média de discordâncias

O modelo combina encruamento e recuperação de Estrin–Mecking com cinética JMAK. A subrotina calcula a densidade média de discordâncias, a fração recristalizada (XDRX) e o tamanho médio de grão pela regra das misturas [2, 3].

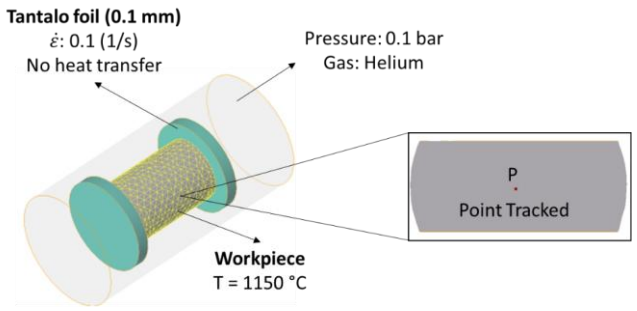


Figura 1. Modelo 3D e ponto de acompanhamento microestrutural.

Resultados e Discussão

As curvas de força simuladas aproximaram-se dos ensaios, com maior discrepância a 5 s^{-1}.

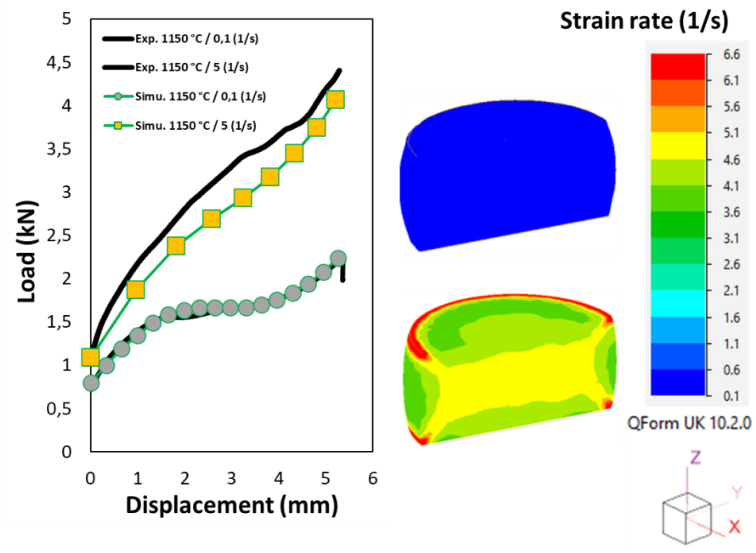


Figura 2. Força e deslocamento experimental x simulação numérica e mapas de taxa de deformação para 0,1 e 5 s^{-1}.

A maior taxa de deformação antecipou a recristalização no tempo e reduziu o tamanho final de grão. A previsão acompanhou a tendência experimental, enquanto os mapas revelaram heterogeneidade espacial.

As distribuições experimentais indicaram grãos mais finos e homogêneos a 5 s^{-1}.

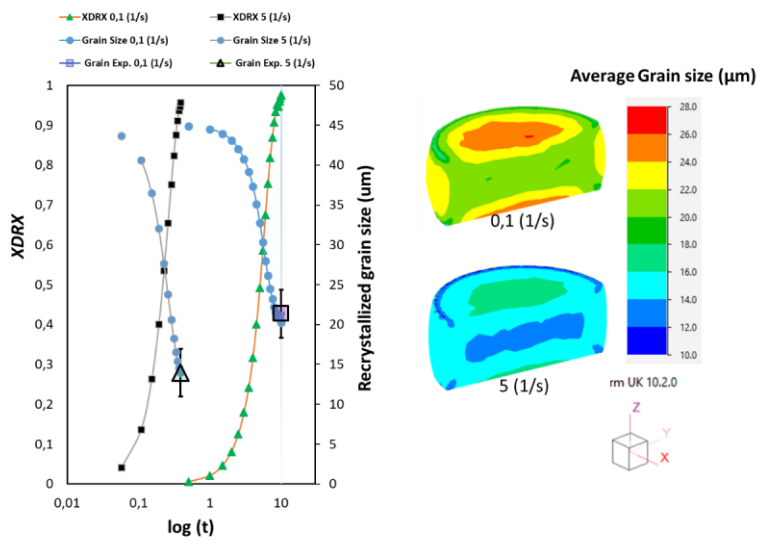


Figura 3. Fração recristalizada e tamanho de grão: simulação e experimento. Mapas em µm para 0,1 e 5 s^{-1}.

Conclusões

A subrotina relacionou o comportamento de escoamento à evolução microestrutural do aço DIN 18MnCrSiMo6-4.

Nas condições estudadas, o aumento da taxa de deformação favoreceu o refino do grão austenítico e reduziu o tempo de recristalização.

A concordância com as tendências experimentais sustenta o uso da abordagem como apoio ao planejamento do forjamento controlado. A aplicação a outras condições requer calibração específica.

Referências e agradecimentos

[1] IVANISKI, T. M. et al. Numerical and experimental study of an industrial case for grain size evolution in bainitic steel in controlled hot forging and its influence on mechanical performance. Materials Research, v. 25, n. 1, 2022.
[2] IVANISKI, T. M. et al. Constitutive modelling of high temperature flow behaviour for a low carbon high silicon bainitic steel. Materials Research, v. 23, n. 5, 2020.
[3] ESTRIN, Y.; MECKING, H. A unified phenomenological description of work hardening and creep based on one-parameter models. Acta Metallurgica, v. 32, n. 1, p. 57–70, 1984.

Apoio: CAPES/BRAGECRIM (1844/2017), DFG (EP 128/6-2), CNPq (167948/2017-2 e 316374/2021-0), SIXPRO e IBF–RWTH Aachen.