

**44° SENAFOR**

28ª Conferência Internacional de Forjamento - Brasil  
14ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 11º Congresso do BrDDR  
14ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis  
3ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura  
Porto Alegre, RS, dias 1, 2 e 3 de outubro de 2025  
[www.senafor.com](http://www.senafor.com)

# INVESTIGAÇÃO DO FORJAMENTO A MORNHO DO AÇO MICROLIGADO AO VANÁDIO DIN 30MnVS6

André Rosiak <sup>(1)</sup>  
Vicente Martin Biason <sup>(2)</sup>  
Helena Bonow Silveira <sup>(3)</sup>  
Marina Barletta Sommer <sup>(4)</sup>  
Lirio Schaeffer <sup>(5)</sup>

## ABSTRACT

Este trabalho investigou os efeitos da temperatura e do nível de deformação no forjamento a morno do aço microligado ao vanádio DIN 30MnVS6. Foram realizados ensaios de forjabilidade em quatro temperaturas (600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C), com posterior caracterização microestrutural, avaliação de dureza, análise da rugosidade superficial e simulação numérica do processo. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura favorece mecanismos termicamente ativados, como recristalização dinâmica, reduzindo as forças de conformação e refinando a microestrutura. Por outro lado, temperaturas intermediárias (600 °C e 700 °C) proporcionaram maior endurecimento por deformação e melhor acabamento superficial, associado a menor oxidação. O estudo comprova a viabilidade do forjamento a morno para o aço 30MnVS6, destacando seu potencial para a produção de peças forjadas de alta resistência e qualidade superficial, sem a necessidade de tratamentos térmicos adicionais. **Palavras-chave:** Forjamento a morno; Aço microligado; DIN 30MnVS6.

## 1. INTRODUÇÃO

As crescentes pressões econômicas e ambientais por processos mais sustentáveis e competitivos têm impulsionado a indústria de manufatura a buscar soluções inovadoras. Nesse cenário, o desenvolvimento de novos conceitos de aços e processos de forjamento capazes de conferir propriedades aprimoradas sem a necessidade de tratamentos térmicos onerosos tem se mostrado promissor para a redução de custos e emissões [1-6].

Apesar dos avanços significativos em pesquisa e desenvolvimento nessa área, uma alternativa tecnicamente atrativa tem sido pouco explorada: o forjamento a morno. Essa tecnologia representa um ponto de equilíbrio entre o forjamento a quente e a frio, ao aliar a boa conformabilidade do primeiro com a maior precisão dimensional e as excelentes propriedades mecânicas do segundo. Assim, o forjamento a morno desponta como uma alternativa estratégica para a indústria, com grande potencial de contribuir para a eficiência e a sustentabilidade dos processos de fabricação [7].

Apesar do grande potencial do forjamento a morno, sua adoção ainda enfrenta desafios significativos, sobretudo devido à escassez de dados quantitativos consolidados e à variabilidade dos parâmetros de processo. Em razão disso, muitas empresas tendem a priorizar rotas já consolidadas nas fases iniciais de desenvolvimento de produtos, favorecendo alternativas com maior previsibilidade econômica e menor risco tecnológico. No entanto, uma vez que o forjamento a morno é devidamente estabelecido para uma aplicação específica, ele tende a se consolidar como a rota preferencial de fabricação — especialmente em contextos que demandam a combinação entre elevado desempenho mecânico, alta precisão dimensional e viabilidade econômica.

As ligas de aço tipicamente empregadas no forjamento a morno incluem aços ao carbono e aços ligados Cr-Ni, Cr-Mn e Cr-Mo [7]. A aplicação de outras classes de aço nesse processo ainda permanece pouco explorada. Entre as alternativas com potencial promissor, destacam-se os aços microligados de médio carbono, que reúnem características favoráveis ao desempenho mecânico e à racionalização do processamento termomecânico.

Os aços microligados de médio carbono são amplamente utilizados no forjamento a quente devido a possibilidade de obtenção de componentes com propriedades mecânicas elevadas por meio de uma rota de processamento termomecânico simplificada. As propriedades finais das peças — comparáveis às de aços convencionalmente temperados e revenidos — são alcançadas através do resfriamento controlado a partir das temperaturas de conformação a quente [8,9]. O aumento da resistência mecânica é obtido, principalmente, por meio da elevação da fração volumétrica de perlita, do refino de grão e do endurecimento por precipitação na matriz ferrítica. O refino de grão é promovido por adições controladas de microligantes como alumínio (Al), nióbio (Nb) ou titânio (Ti), enquanto o endurecimento por precipitação é intensificado pela adição de vanádio (V). Este último favorece a formação de partículas finas de carbonitretos de vanádio V(CN) na ferrita durante o resfriamento após a conformação. Estima-se que cada incremento de 0,01% em peso de vanádio pode resultar em um aumento de 5 a 15 MPa na resistência, a depender do teor de carbono e da taxa de resfriamento adotada [10].

Neste estudo, o efeito do forjamento a morno sobre a microestrutura e a dureza do aço microligado ao vanádio DIN 30MnVS6 é investigado. Ensaio de forjabilidade foram conduzidos com o objetivo de compreender o efeito combinado da temperatura de forjamento e do nível de deformação nas características do material.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise do efeito do forjamento a morno no aço DIN 30MnVS6 foi precedida por uma caracterização detalhada do material em sua condição de fornecimento. Inicialmente, realizou-se a análise microestrutural por meio de microscopia óptica, utilizando técnicas metalográficas convencionais. Para a avaliação da dureza, foram realizados ensaios de microdureza com o auxílio de um microdurômetro modelo Hardness Tester ISH-TDV 1000, da marca INSIDE. A caracterização química do aço foi conduzida com o uso de um espectrômetro de emissão óptica por centelhamento, modelo Q2ION, da fabricante BRUKER. Os resultados da composição química,

expressos em percentual em massa, encontram-se apresentados na Tabela 1, estando em conformidade com as faixas nominais reportadas na literatura [11].

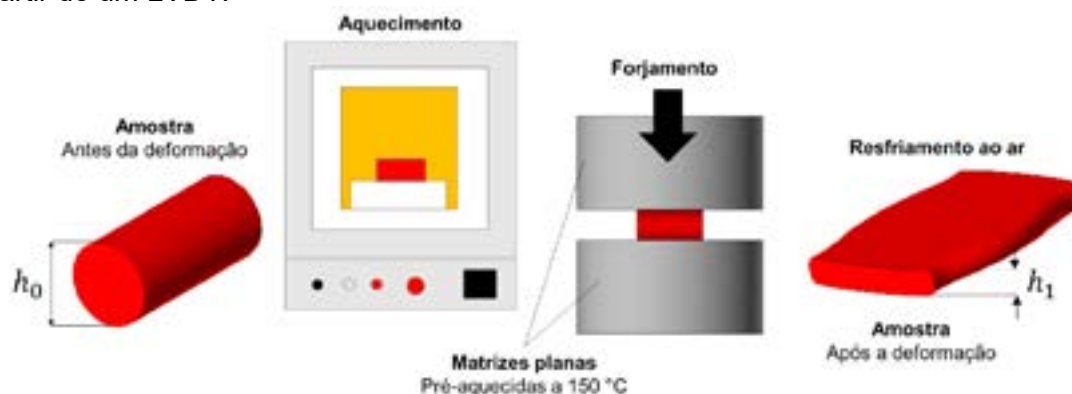
**Tabela 1.** Resultado da análise química do aço DIN 30MnVS6 (% em massa).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	V
% massa	0,262	0,484	1,210	0,024	0,020	0,111

A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, o procedimento adotado nos ensaios de forjabilidade. Os testes consistiram na compressão de corpos de prova cilíndricos entre matrizes planas. Para cada ensaio, os corpos de prova foram inicialmente aquecidos em forno resistivo até a temperatura de forjamento e, em seguida, transferidos para uma prensa hidráulica da marca EKA, com velocidade de 15mm/s e capacidade de 40t, onde o processo de deformação foi realizado. As matrizes planas foram previamente aquecidas a 150 °C e recobertas com lubrificante à base de grafite, a fim de reduzir o atrito durante o forjamento.

A Tabela 2 resume os parâmetros empregados nos ensaios de forjabilidade. Foram avaliadas diferentes temperaturas de forjamento: 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C. Além disso, as amostras foram submetidas a dois níveis de deformação. Considerou-se como altura inicial  $h_0$  o valor igual ao diâmetro da amostra, de 16,5 mm.

Durante os ensaios de forjamento, foi realizada a aquisição de dados de força e deslocamento da prensa. A ferramenta inferior é montada sobre uma célula de carga, para medição da força de conformação. Para o registro do sinal de carga, um módulo de aquisição de dados analógicos (HBM® - SPIDER 8®) e o software CATMAN® foram utilizados. Dados referentes ao deslocamento da matriz superior são obtidas a partir de um LVDT.



**Figura 1.** Desenho esquemático dos ensaios de forjabilidade a morno.

**Tabela 2.** Parâmetros dos ensaios de forjabilidade a morno do DIN 30MnVS6.

Temperatura (T)	Reduções em altura, $\Delta h$ [%]
600°C	35
	40
700°C	35
	45
800°C	35
	55
900°C	35
	55

As amostras forjadas foram seccionadas transversalmente para a realização da análise microestrutural e para a construção do perfil de microdureza ao longo da seção. Devido ao atrito nas superfícies de contato durante a compressão, ocorre o fenômeno de embarrilamento, que resulta em uma distribuição heterogênea da deformação na seção transversal da amostra. A determinação do perfil de dureza

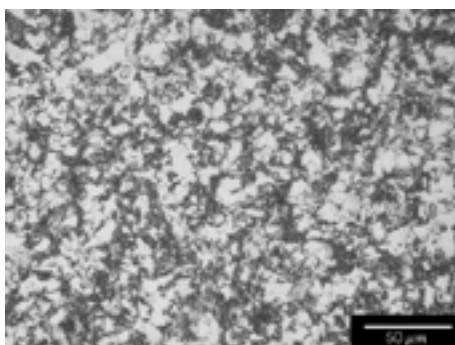
nesta região permite correlacionar os diferentes níveis de deformação plástica com as variações locais de dureza, fornecendo uma visão detalhada dos efeitos mecânicos induzidos pelo forjamento a morno

Com o objetivo de avaliar o efeito da temperatura de forjamento a morno na qualidade superficial das peças, as amostras forjadas também foram submetidas à medição de rugosidade superficial. As avaliações foram realizadas utilizando um rugosímetro portátil Mitutoyo SJ-310, conforme os parâmetros definidos pela norma NBR ISO 4287:2002.

A análise inversa do procedimento experimental foi conduzida por meio de simulações tridimensionais utilizando o software QForm UK, com base no método dos elementos finitos. Para assegurar a confiabilidade dos resultados numéricos, foi realizada uma etapa de validação comparando-se a largura máxima da amostra, medida na região da meia-altura, obtida experimentalmente e numericamente ao final do processo. Essa comparação permite avaliar a acurácia do modelo numérico, especialmente no que se refere à previsão dos níveis de deformação plástica [12].

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta a microestrutura do aço microligado ao vanádio DIN 30MnVS6 na condição inicial. A microestrutura é caracterizada por grãos equiaxiais de ferrita e colônias dispersas de perlita. Essa configuração microestrutural confere ao material uma dureza média 248 HV.

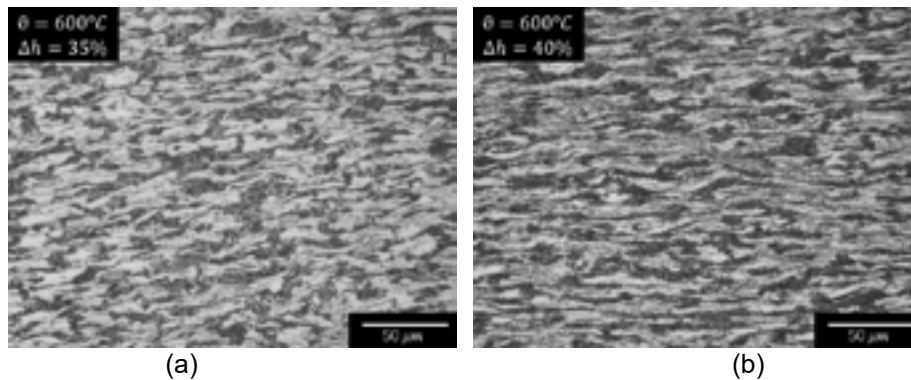


**Figura 2** Microestrutura do aço DIN 30MnVS6 na condição inicial.

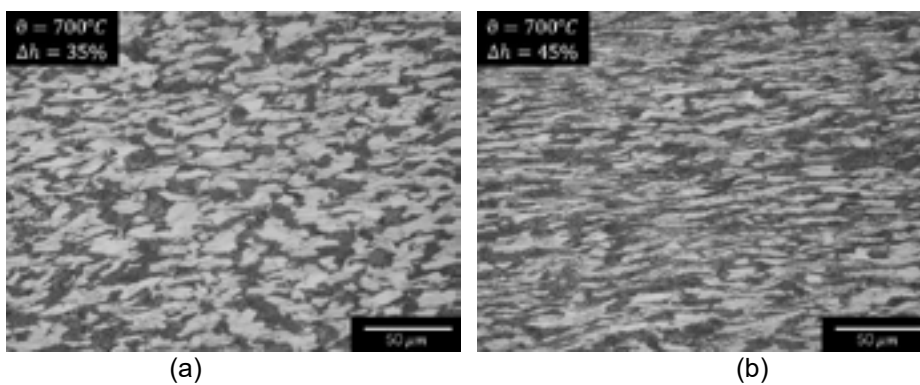
As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam a microestrutura do aço microligado DIN 30MnVS6 após deformação nas temperaturas de 600 °C, 700 °C, 800 °C e 900 °C, respectivamente. Nas temperaturas de 600 °C e 700 °C, o aquecimento não é suficiente para induzir transformação de fase no material. Como consequência, a deformação plástica resulta no alinhamento da microestrutura ferrita-perlita na direção da deformação, com os grãos equiaxiais de ferrita sendo progressivamente achatados e alongados. As colônias de perlita, por sua maior resistência, sofrem deformação em menor grau.

O aumento da temperatura de aquecimento de 600 °C para 700 °C resulta em um discreto crescimento dos grãos de ferrita, observado em ambos os níveis de deformação analisados. Além disso, o aumento da deformação promove maior alongamento dos grãos de ferrita em ambas as temperaturas de forjamento, evidenciando o efeito combinado da temperatura e da deformação plástica na evolução microestrutural.

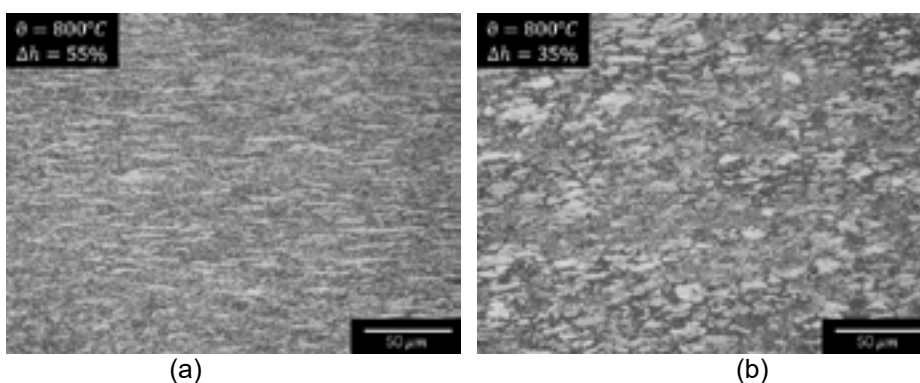
O aquecimento a 800 °C conduz o material ao campo bifásico ( $\alpha + \gamma$ ), no qual uma fração da microestrutura sofre austenitização. Como resultado, ocorrem transformações de fase durante o resfriamento subsequente. Além disso, o aumento da temperatura de forjamento favorece o desenvolvimento de fenômenos termicamente ativados, como a recristalização dinâmica, que contribui para o refinamento microestrutural.



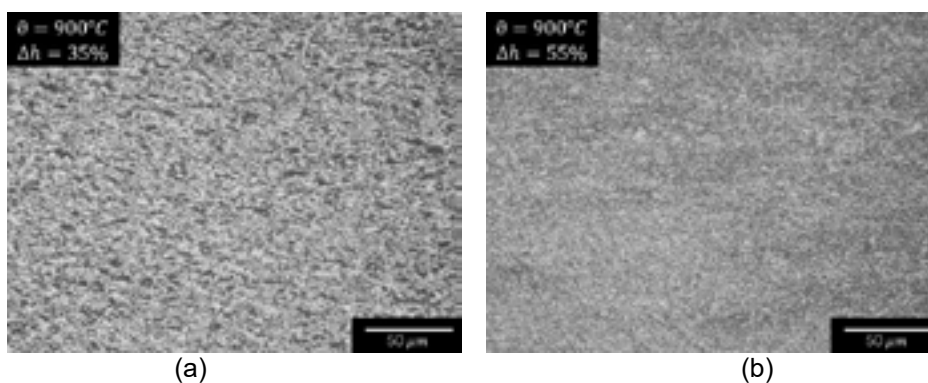
**Figura 3** Microestrutura do aço DIN 30MnVS6 forjado a 600°C.



**Figura 4** Microestrutura do aço DIN 30MnVS6 forjado a 700°C.



**Figura 5** Microestrutura do aço DIN 30MnVS6 forjado a 800°C.



**Figura 6** Microestrutura do aço DIN 30MnVS6 forjado a 900°C.

No forjamento a 800 °C, uma redução de 35% na altura promove a formação de uma matriz composta por grãos de ferrita recristalizados, levemente alongados, e

colônias de perlita. Com o aumento da deformação para uma redução de altura de 55%, os grãos de ferrita recristalizados apresentam maior alongamento em razão do incremento da deformação. A microestrutura resultante apresenta morfologia semelhante à observada nas temperaturas de 600 °C e 700 °C, porém com um refinamento microestrutural significativamente superior.

O aquecimento a 900 °C promove a completa austenitização do material, resultando na transformação integral da microestrutura após o processamento termomecânico. A combinação entre a transformação de fase e a recristalização dinâmica ocorrida durante o forjamento gera uma microestrutura composta por grãos equiaxiais de ferrita extremamente refinados, acompanhados por colônias de perlita igualmente finas. O aumento da deformação para uma redução de altura de 55% intensifica o processo de recristalização, promovendo um refinamento microestrutural ainda mais acentuado.



**Figura 7** Dureza média das amostras submetidas a 35% de redução em altura.

A Figura 7 apresenta os valores de dureza das amostras submetidas a uma redução de 35% em altura nas diferentes temperaturas analisadas. As amostras deformadas a 600 °C e 800 °C exibem as maiores durezas médias, com 284,7 HV e 283,5 HV, respectivamente. Em relação a condição inicial, o forjamento nestas condições gerou um incremento de dureza de cerca de 15%.

A amostra processada a 900 °C apresenta a menor dureza média entre as condições avaliadas. Embora apresente microestrutura refinada devido à recristalização dinâmica, uma possível redução na fração volumétrica de perlita após a transformação de fase induzida termomecanicamente, pode justificar o valor de dureza inferior observado.

A dureza da amostra processada a 700 °C pode estar relacionada ao crescimento dos grãos de ferrita. As condições termomecânicas nesta temperatura parecem ser suficientes para promover o engrossamento microestrutural, mas insuficientes para desencadear a recristalização.

A Figura 8 apresenta os resultados numéricos da distribuição da deformação equivalente nas amostras submetidas a diferentes níveis de redução de altura. Em todas as condições analisadas, observa-se um padrão semelhante de distribuição, com menores níveis de deformação na periferia e valores crescentes em direção ao centro da amostra. Como era esperado, o aumento da redução de altura resulta em maior magnitude de deformação acumulada.

Na Figura 9, os dados numéricos de deformação equivalente são correlacionados com os perfis de dureza das amostras forjadas. De modo geral, todas as condições analisadas apresentam comportamento semelhante, com aumento da dureza em função do nível de deformação. No entanto, a forma como esse aumento de dureza ocorre varia entre as diferentes condições avaliadas.

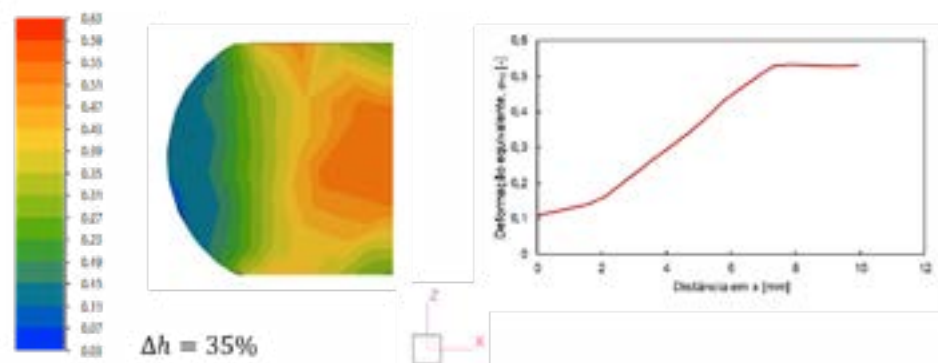
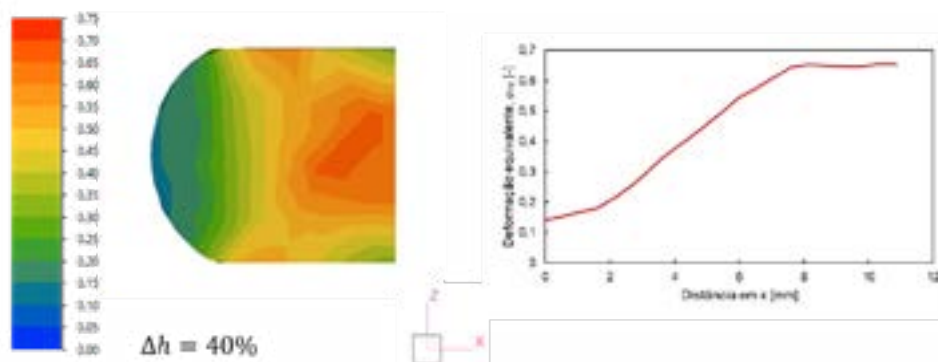
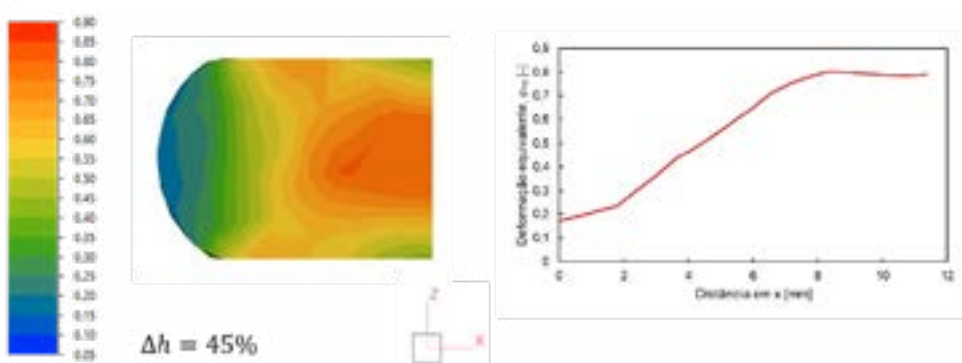
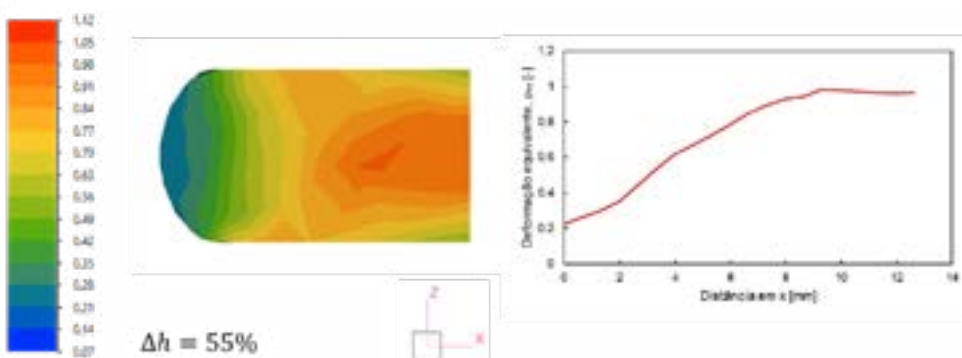
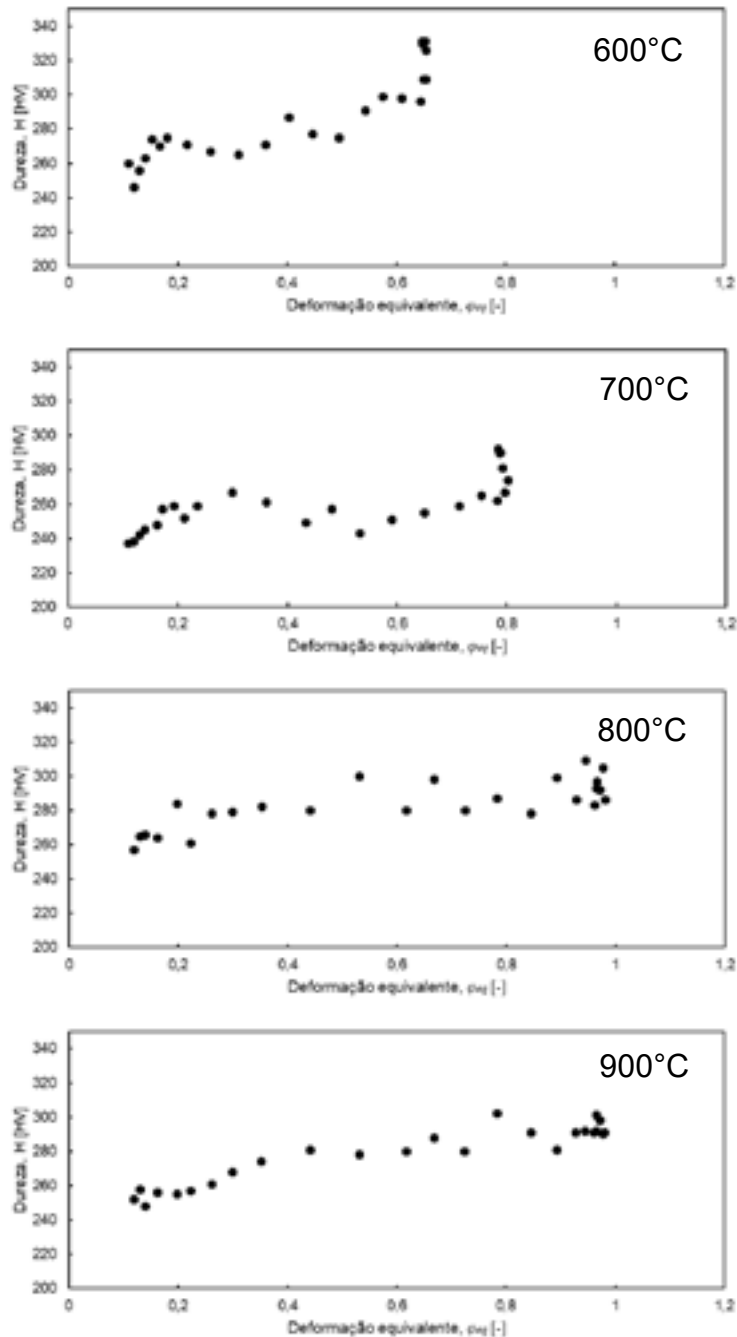
Deformação equivalente,  $\varphi_{eq}$  [-]Deformação equivalente,  $\varphi_{eq}$  [-]Deformação equivalente,  $\varphi_{eq}$  [-]Deformação equivalente,  $\varphi_{eq}$  [-]

Figura 8 Distribuição da deformação equivalente nas amostras deformadas.



**Figura 9** Relação entre os valores de dureza e a deformação equivalente.

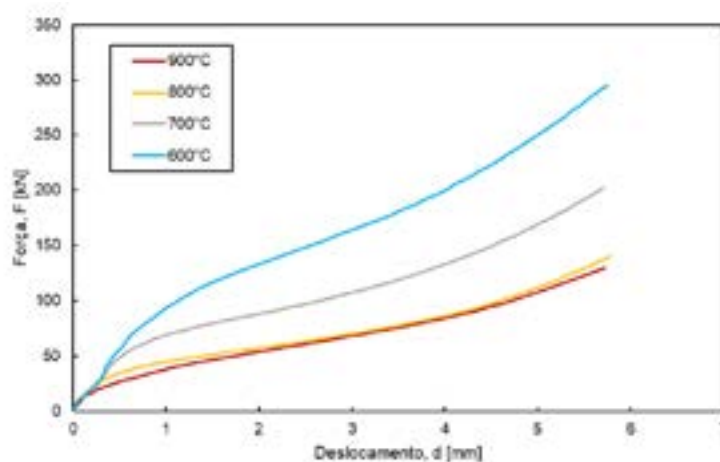
A amostra forjada a 600 °C se destaca por apresentar um aumento expressivo da dureza com a deformação. Os valores variam de um mínimo de 246 HV — próximo à dureza da condição inicial — até 331 HV. Para níveis de deformação entre 0,1 e 0,65, observa-se um incremento de dureza de aproximadamente 35%.

No forjamento a 700 °C, o aumento da dureza em função da deformação é menos expressivo que o verificado a 600 °C. A dureza mínima observada é de 237 HV para uma deformação equivalente de  $\phi_{\sigma\sigma} = 0,11$ , enquanto o valor máximo atinge 300 HV em  $\phi_{\sigma\sigma} = 0,78$ .

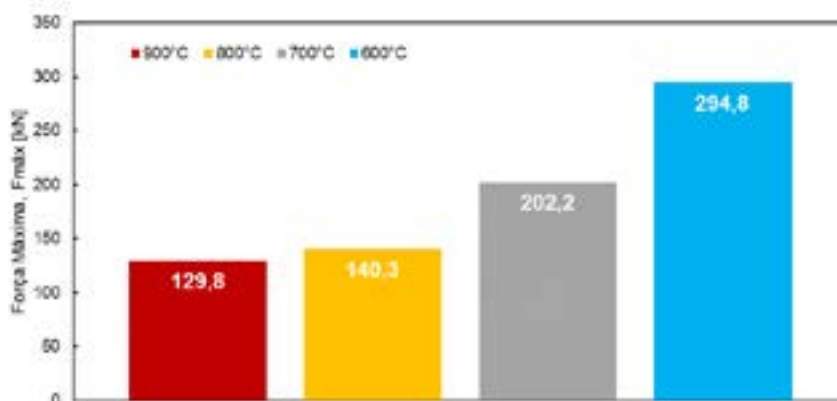
As amostras forjadas a 800 °C e 900 °C apresentam comportamento bastante semelhante. Em ambas as condições, os valores de dureza situam-se em torno de 250 HV para níveis mais baixos de deformação, alcançando aproximadamente 300 HV

para deformações próximas de  $\varphi_{gr} = 0.8$ . A partir desse ponto, a dureza estabiliza, mantendo-se em torno de 300 HV, mesmo com o aumento adicional da deformação. A redução das forças de conformação é um dos principais benefícios associados ao forjamento a morno. Para quantificar o efeito da temperatura de forjamento sobre a força requerida, foram obtidos dados de força e deslocamento durante os ensaios. A Figura 10 apresenta a evolução da força de forjamento em função do deslocamento da prensa para uma redução de altura de 35%. Já a Figura 11 compara os valores máximos de força de forjamento nas diferentes temperaturas analisadas, também para 35% de redução.

As curvas força-deslocamento exibem comportamento semelhante entre si, com tendência de aumento nas cargas requeridas à medida que a temperatura de forjamento diminui. O forjamento a 900 °C demanda a menor força, enquanto a redução da temperatura para 800 °C resulta em um aumento discreto da carga máxima, de aproximadamente 8%, indicando que essa condição ainda representa uma alternativa eficiente em termos de consumo energético.



**Figura 10** Evolução da força de forjamento em função do deslocamento da prensa para a redução de altura de 35%.



**Figura 11** Força máxima de forjamento para a redução de altura de 35%.

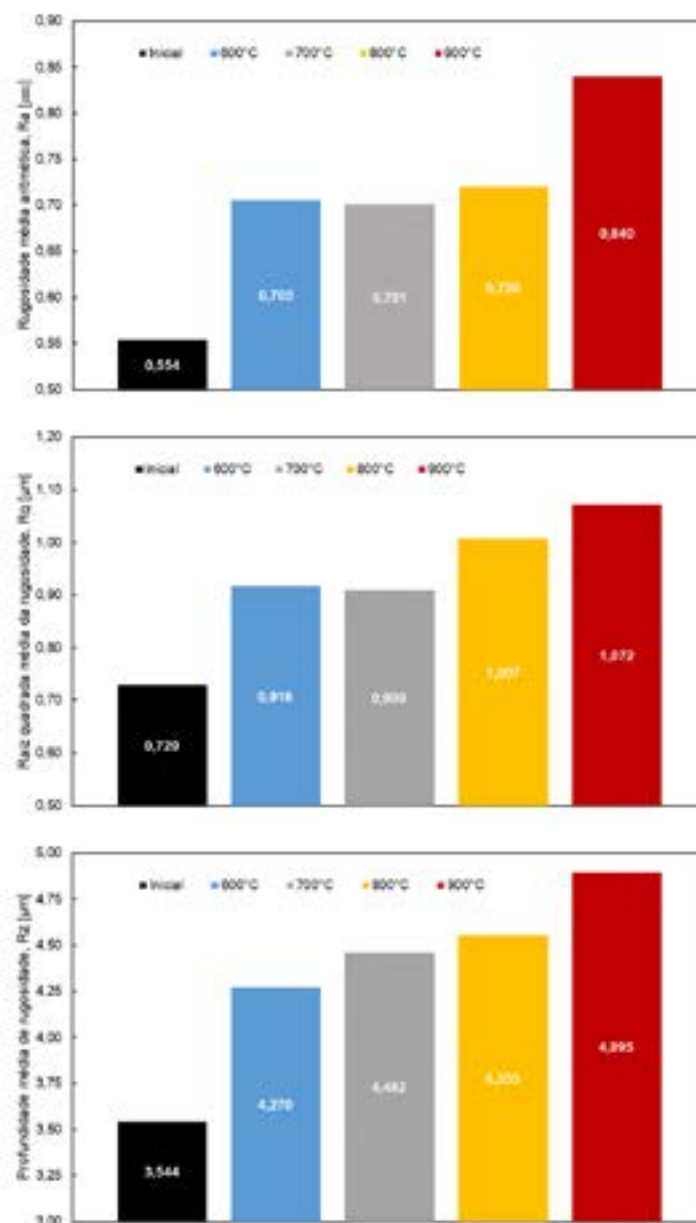
A conformação a 700 °C e 600 °C, por outro lado, requer forças significativamente mais elevadas. O forjamento a 700 °C demanda uma força aproximadamente 55% superior à observada a 900 °C, enquanto a 600 °C esse aumento atinge 127%.

Nas temperaturas de 900 °C e 800 °C, a presença de austenita durante a deformação e a ocorrência de mecanismos termicamente ativados, como a recuperação e a recristalização dinâmica, resulta em menores tensões de escoamento

e, conseqüentemente, em menores forças de conformação. Já nas condições de 700 °C e 600 °C, não ocorre transformação de fase, e, conforme evidenciado pelas micrografias, não há indícios de recristalização. Em razão disso, o material mantém alta resistência ao escoamento durante a deformação, exigindo forças significativamente maiores para o processamento.

As maiores forças exigidas durante o forjamento a 600 °C e 700 °C impossibilitaram a reprodução da redução de 55% em altura para todas as temperaturas analisadas. Essa limitação justifica os diferentes níveis de deformação considerados na análise.

Outro importante benefício associado ao forjamento a morno é a melhoria da qualidade superficial das peças em comparação ao forjamento a quente, no qual a formação de óxidos superficiais é significativamente intensa. Para avaliar o efeito da temperatura de forjamento na qualidade superficial, foi realizada a quantificação da rugosidade das amostras, cujos resultados são apresentados na Figura 12.



**Figura 11** Rugosidade das amostras forjadas em diferentes temperaturas e da condição inicial

Como era esperado, a condição inicial apresenta os menores valores de rugosidade para todos os parâmetros analisados, refletindo o acabamento das barras descascadas. Com o aumento da temperatura de forjamento, observa-se uma elevação nos valores de rugosidade, sendo os maiores registrados na condição de 900 °C ( $R_a = 0,840 \mu\text{m}$ ;  $R_q = 1,072 \mu\text{m}$ ;  $R_z = 4,895 \mu\text{m}$ ). Entre as amostras forjadas, as temperaturas de 600 °C e 700 °C resultam nos menores índices de rugosidade, indicando melhor qualidade superficial. Esse comportamento está associado à maior formação de óxidos superficiais em temperaturas mais elevadas. O forjamento nas temperaturas de 600 °C, 700 °C e 800 °C resulta em superfícies com rugosidade média compatível com a classe de acabamento N6, conforme a norma ABNT NBR 6405, que classifica os acabamentos superficiais com base nos valores de rugosidade  $R_a$ . A classe N6 indica um acabamento fino, com boa qualidade superficial. Já o forjamento a 900 °C apresenta rugosidade correspondente à classe N7, indicando um acabamento médio, com a superfície aceitável para funções mecânicas comuns.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou que o forjamento a morno do aço microligado ao vanádio DIN 30MnVS6 resulta em microestruturas refinadas, com ganhos significativos de dureza e qualidade superficial, especialmente na temperatura de 800 °C. Nessa condição, observou-se a combinação entre boa conformabilidade, redução das forças de forjamento e acabamento superficial compatível com a classe N6 de rugosidade.

Temperaturas mais baixas (600 °C e 700 °C) proporcionaram maior endurecimento por deformação, enquanto temperaturas mais elevadas (900 °C) favoreceram mecanismos de recristalização dinâmica. A 900 °C, apesar da menor força de conformação, observou-se pior acabamento superficial devido à oxidação.

Os resultados evidenciam a viabilidade técnica do forjamento a morno como alternativa aos processos convencionais, com potencial para produzir forjados de alta qualidade e resistência, reduzindo custos com tratamentos térmicos e melhorando a eficiência produtiva. O aço DIN 30MnVS6 se destaca como material promissor para aplicações estruturais, contribuindo para o avanço de rotas mais sustentáveis e competitivas na indústria metalúrgica.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a CNPq, CAPES e FAPERGS pelo apoio financeiro.

#### REFERENCIAS

- [1] BLECK, W., BAMBACH, M., WIRTHS, V., STIEBEN, A., Microalloyed Engineering Steels with Improved Performance—An Overview. *HTM J. Heat Treatm. Mat.*, 2017.
- [2] BUCHMAYR B., Critical Assessment 22: bainitic forging steels, *Materials Science and Technology*, 2016.
- [3] ERIŞIR E., AYHAN İ.İ., GÜNEY C., Microstructure and Phase Transformations in High-Strength Bainitic Forging Steel. *J. of Materi Eng and Perform* 30, 3458–3467, 2021.
- [4] GRAMLICH A., LANGE R., ZITZ U., BÜßENSCHÜTT K., Air-Hardening Die-Forged Con-Rods—Achievable Mechanical Properties of Bainitic and Martensitic Concepts, *Metals*, 2022.
- [5] Stieben A. , Bleck W. , Schönborn S., Lufthärtender duktiler stahl mit mittlerem mangangehalt für die massivumformung (2016)
- [6] Gramlich A., T. Schmiedl, S. Schönborn, T. Melz, W. Bleck, Development of air-hardening martensitic forging steels, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 784, 15 May 2020, 139321
- [7] INTERNATIONAL COLD FORGING GROUP, document No.18/07, 40 Years History Document, 2007.

- [8] EXEL N., TÜRK M., Einfluss von Faserverlauf und Gefüge auf die Schwingfestigkeit Warmmassivumgeformter AFP-Stähle, Final Report, AVIF A 245, Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V., 2010.
- [9] KREMER C. & MULLER-BABIC K., Connecting Rods Made of Micro-alloyed Forged Steel, DEVELOPMENT Materials, MTZ worldwide volume 81, 2020.
- [10] Kuratomi, H., Uchino, M., Kurebayashi, Y., Namiki, K., Sugiura S., Development of Lightweight Connecting Rod Based on Fatigue Resistance Analysis of Microalloyed Steel, SAE Technical Paper, 1990.
- [11] BS EN 10267-1999, Ferritic-Pearlitic Steels for Precipitation Hardening from Hot-working Temperatures, 1999.
- [12] BAO, Y., Prediction of Ductile Crack Formation in Uncracked Bodies, Engineering Mechanics, Wuhan University of Technology, 1993.