

DESENVOLVIMENTO DE ENSAIO PARA SIMULAÇÃO FÍSICA DE CONSOLIDAÇÃO DO FECHAMENTO DE VAZIOS INTERNOS DURANTE CONFORMAÇÃO MECÂNICA A QUENTE DE AÇOS*

*Gustavo Acarine Ferraz de Campos¹
Roberto Tiburcio Canito Frota Junior²
Alberto Moreira Jorge Junior³*

Resumo

Vazios internos em produtos forjados afetam negativamente as suas propriedades mecânicas e redução de sua vida útil. Para se evitar este tipo de perda, devem-se elaborar processos que propiciem a consolidação de seu fechamento mecânico durante o processo de conformação a quente. A escolha dos parâmetros de processo ideais para propiciar a consolidação do fechamento requer uma escolha precisa dos parâmetros termomecânicos. Como atualmente não há ensaios padronizados para se analisar a influência das variáveis de processo, este trabalho busca desenvolver um ensaio que simule fisicamente as condições de conformação mecânica, como deformação, temperatura e tempo, para tornar possível a análise das diversas combinações de parâmetros e seus efeitos na consolidação do fechamento de vazios internos. O ensaio foi desenvolvido com o simulador termomecânico Gleeble 1500D, incluindo definição da geometria do corpo de prova e criação de dispositivo para preparação da superfície a ser consolidada. Simulações físicas de consolidação de fechamento foram realizadas com sucesso após a definição do método de ensaio. Isto permite a identificação de condições mais favoráveis de carregamento nas quais a junção seja satisfatória..

Palavras-chave: Simulação Física; Soldagem por Difusão; Conformação Mecânica a Quente, Fechamento de Vazios.

TEST DEVELOPMENT FOR PHYSICAL SIMULATION OF DIFFUSION BONDING IN CLOSURE OF INTERNAL VOIDS DURING STEEL HOT METAL FORMING

Abstract

Internal voids in forged products hurt its mechanical properties and its reduced lifespan. To avoid this type of loss, processes must be elaborated to promote the void closure and diffusion bonding during hot metal forming. Choosing the ideal process parameters to promote the closure and diffusion bonding during hot mechanical working requires a precise choice of thermomechanical parameters. As there are no standardized tests to analyze the influence of the process variables nowadays, this work aims to develop a test that physically simulates the thermomechanical conditions such as strain, temperature and time, making it possible to analyze the different parameters combinations and their effects on the diffusion bonding of the internal voids. The test was developed using a thermomechanical simulator Gleeble 1500D, including the definition of the test specimen geometry and creation of a device to prepare the surface to be bonded. Diffusion bonding physical simulations were done with success after the test method definition. This allows the identification of more favorable load conditions at which the bond is satisfactory.

Keywords: Physical Simulation; Diffusion Bonding; Hot Metal Forming; Void Closure.

- ¹ *Engenheiro de Materiais, Engenheiro de Processos, Villares Metals S.A., Sumaré, SP, Brasil.*
- ² *Mestre em Engenharia Mecânica, Engenheiro Pesquisador, Villares Metals S.A., Sumaré, SP, Brasil.*
- ³ *Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, Professor do Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o tamanho dos lingotes tem aumentado cada vez mais de maneira a atender a demanda crescente de produtos forjados, como eixos para geração de energia e moldes plásticos. O aumento do lingote tende a resultar no aumento na quantidade de defeitos metalúrgicos, como segregação e vazios. Para melhorar a qualidade destes produtos deve-se, em seu processo de forjamento, eliminar estes defeitos.

O método dos elementos finitos (MEF) é muito utilizado para melhorar os processos de forjamento, os quais abordam principalmente o fechamento mecânico do vazio, onde há diversos tipos de abordagem [1], mas eles possuem ainda uma lacuna: a consolidação do fechamento do vazio. O MEF dará como resultado uma malha de pontos que representam um produto forjado em que teremos toda a evolução de seus diversos parâmetros, como temperatura, tensões e deformações. Nesta malha haverá nós que representam a interface de um vazio com o sólido ao seu redor, os quais ao final da simulação dirão se as faces opostas do vazio estão próximas, mas sem saber se estão consolidadas.

Conhecendo como as diversas variáveis do processo de forjamento influenciam a consolidação do fechamento de vazios internos, é possível analisar através do MEF situações de processo que propiciam a eliminação destes vazios, contribuindo para que o produto atinja as suas especificações e reduzindo os custos da não qualidade associados a este tipo de defeito.

A consolidação do fechamento de vazios internos é um processo de soldagem por difusão entre duas superfícies e que ocorre em temperaturas elevadas, utilizando a aplicação de pressão interfacial. A temperatura em que este processo usualmente é realizado está na faixa de 0,5 a 0,8 da temperatura de fusão [2]. O processo ocorre sem a presença de uma interface líquida (brasagem) ou por uma nova fusão local (soldagem comum) e é um processo geralmente feito a vácuo ou em uma atmosfera inerte [3]. Comparado aos demais processos de junção de materiais, a consolidação do fechamento dos vazios internos elimina problemas de segregação, trincas e tensões de distorção.

Derby e Wallach [4] propuseram um modelo que utiliza vários mecanismos que ajudam a determinar o processo, utilizando variáveis de tempo, temperatura, pressão, rugosidade superficial e razão de aspecto da superfície.

A natureza do processo de junção é a coalescência das duas superfícies do defeito que se completa quando passa por diversos estados metalúrgicos [5] em que cada estágio é associado a um fenômeno metalúrgico dominante, sendo que esses estágios começam e terminam gradualmente, havendo sobreposição entre si.

Alguns métodos de ensaios já foram propostos por diversos autores, como Afshan et al [6] e Li et al [7], nos quais o presente artigo se baseou para realização de testes iniciais.

O presente texto buscará desenvolver um ensaio que possa simular a consolidação do fechamento de vazios internos para que posteriormente possa ser utilizado na determinação dos parâmetros do processo de forjamento necessários para consolidação do fechamento de vazios internos.

A liga escolhida para este desenvolvimento foi o aço comercialmente conhecido como VP20ISO devido ao fato de ser comumente produzido em formato de blocos de grandes dimensões utilizados na produção de moldes plásticos [8].

2 MATERIAIS E EXPERIMENTOS

O material utilizado para a confecção dos diversos corpos de prova foi retirado de um bloco na condição forjada com sua composição química conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço utilizado, corrida 4853861

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	N
(% peso)	0,35	0,36	1,64	0,012	0,0018	1,90	0,30	0,73	0,0005	0,0067

Os ensaios foram conduzidos no equipamento Gleeble 1500D, instalado na Villares Metals SA, e operado no modo de carga, no qual o aquecimento ocorre pelo efeito Joule.

O método do ensaio foi definido no decorrer do tempo, em campanhas que serão descritas no próximo subitem. Cada campanha teve um parâmetro de ensaio a ser analisado, conforme os tópicos:

- Primeira Campanha: Teste Inicial;
- Segunda Campanha: Melhoria na Montagem do Conjunto para Passagem de Corrente e Aquecimento do Corpo de Prova;
- Terceira Campanha: Modificação da Geometria e Método de Confecção do Corpo de Prova.

2.1 Primeira Campanha

2.1.1 Confecção do Corpo de Prova

A primeira Campanha utilizou corpos de prova de geometria cilíndrica conforme mostrado na Figura 1, a qual é uma geometria padrão para ensaios de plasticidade a quente na Gleeble. Após sua usinagem havia a necessidade de se confeccionar um defeito conhecido, então se optou que ele fosse caracterizado por um corte realizado em uma cut-off na metade do comprimento do corpo de prova. A superfície cortada foi então acabada com diversas lixas de grão 80 até 1200.

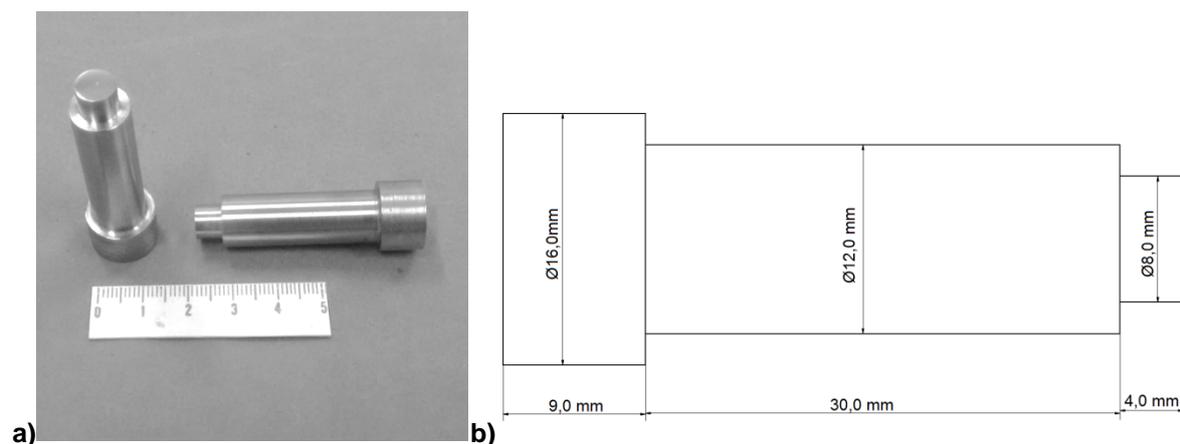


Figura 1. Corpo de prova com contato de 8 mm de diâmetro. a) Fotografia. b) Desenho e dimensões.

2.1.2 Procedimento de Consolidação

Termopares foram soldados próximos às faces a serem soldadas e o corpo de prova foi posicionado no equipamento, conforme Figura 2.

O programa de ensaio pode ser esquematicamente visto na Figura 4, onde se pode observar a aplicação da carga ao mesmo tempo em que se inicia o aquecimento até a temperatura de ensaio, onde a temperatura é mantida por 30 segundos antes de se aplicar a carga estipulada para o ensaio.

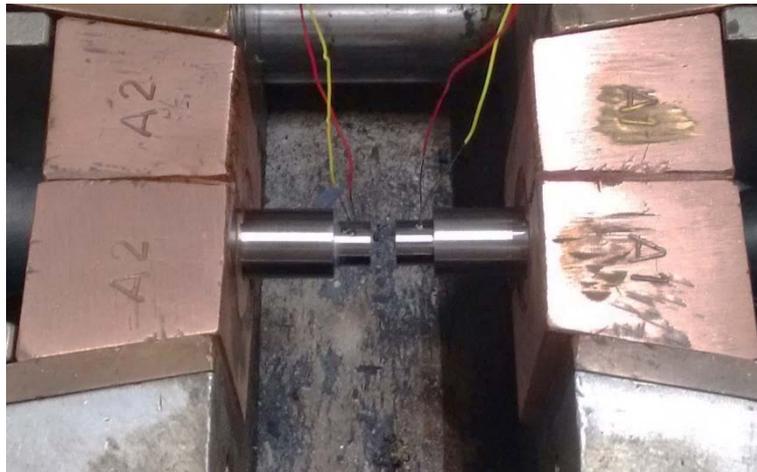


Figura 2. Montagem do ensaio.

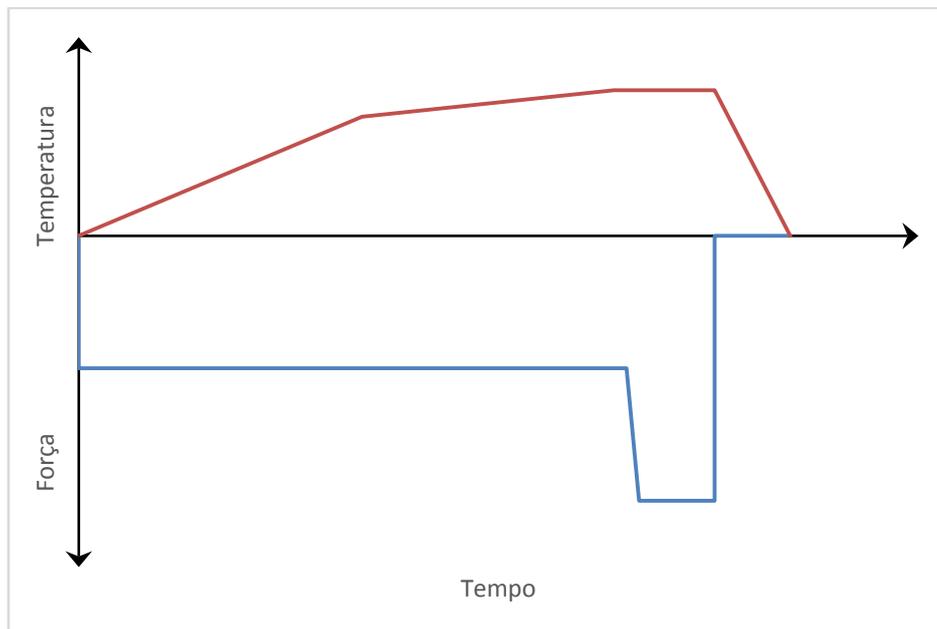


Figura 3. Esquema da variação do tempo, temperatura e força da Erro! Fonte de referência não encontrada..

A temperatura do ensaio foi de 1100°C, a pré-carga definida em -320N e a pressão de ensaio de 39,8MPa.

2.1.3 Resultados da Primeira Campanha

O ensaio falhou, pois não foi possível aquecer o conjunto. Isto ocorreu por não haver um contato satisfatório entre o par de corpo de prova, que impede a passagem de corrente para o aquecimento resultante do efeito Joule.

2.2 Segunda Campanha

2.2.1 Confeção do Corpo de Prova

A Segunda Campanha utilizou a mesma geometria de corpo de prova da primeira campanha, conforme a Figura 1.

2.2.2 Procedimento de Consolidação

Não houve alteração na montagem do conjunto em relação à Primeira Campanha, realizada conforme Figura 2. Após a inserção do par de corpos de prova, foi aplicada uma pré-carga de 1 kN por 30 segundos no conjunto para permitir a acomodação das garras do equipamento e um melhor contato entre as faces do corpo de prova antes de se iniciar o aquecimento.

O programa de ensaio pode ser esquematicamente visto na Figura 4, onde se pode observar a aplicação da pré-carga, seguida de aquecimento até a temperatura de ensaio de 1100°C onde a temperatura é mantida por 30 segundos.

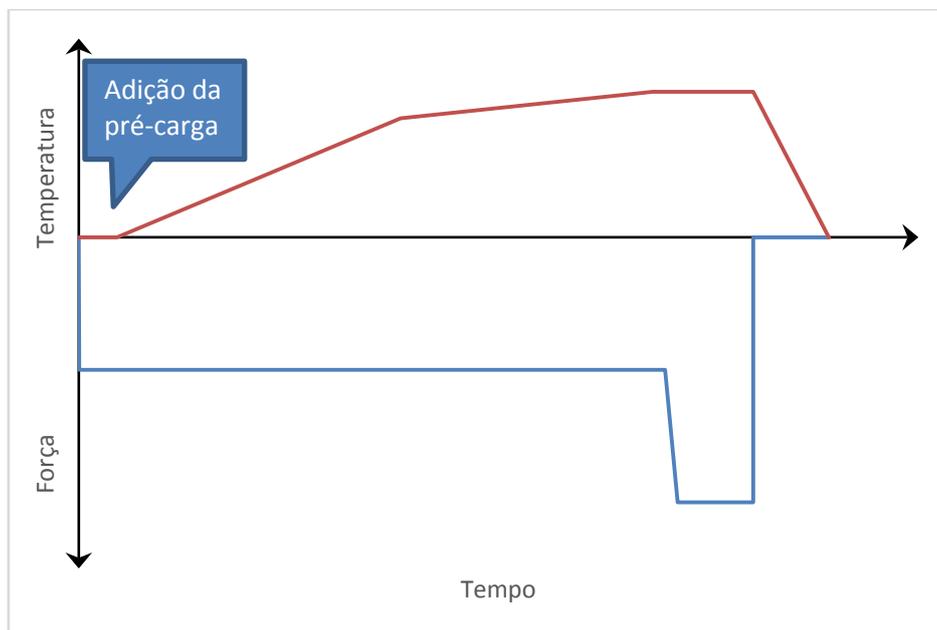


Figura 4. Esquema da variação do tempo, temperatura e força da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

2.2.3 Ensaios Metalográficos

Após o término do ensaio a região transversal ao defeito foi preparada e analisada no microscópio óptico, conforme as Figura 5 e Figura 6.

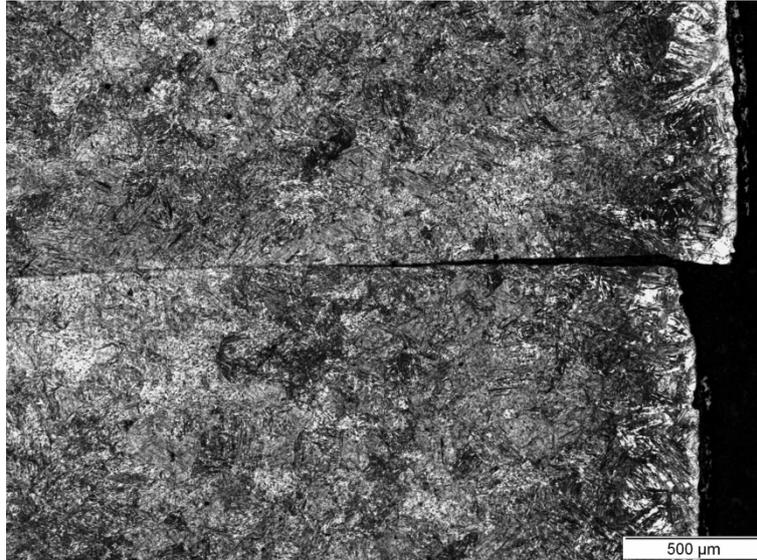


Figura 5. Micrografia da região da borda do corpo de prova ensaiado na segunda campanha. Ataque com Nital 2%. Aumento 50x.

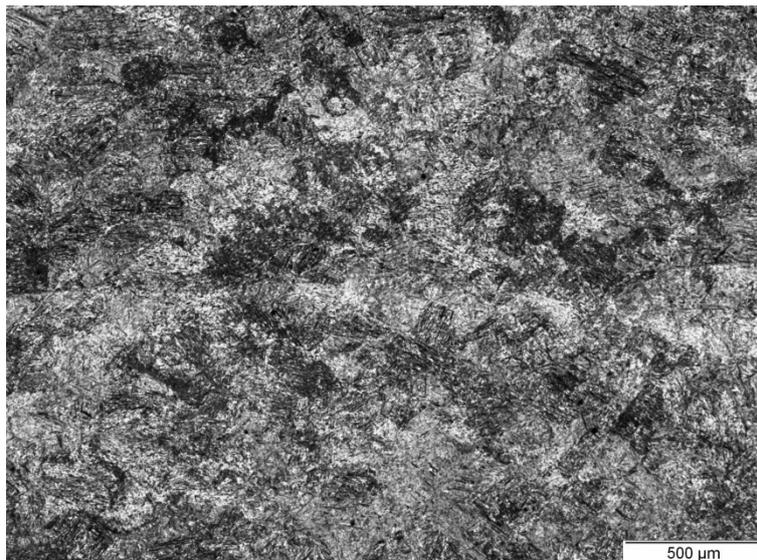


Figura 6. Micrografia da região do núcleo do corpo de prova ensaiado na segunda campanha. Ataque com Nital 2%. Aumento 50x.

Foi notado que na região da borda do corpo de prova havia uma fração significativa na qual não havia contato entre as faces, como pode ser visto na Figura 5. Já na região do núcleo foi possível observar que ocorreu a consolidação parcial das faces, conforme Figura 6.

2.2.4 Resultados da Segunda Campanha

Mediante o exposto foram propostas algumas mudanças aplicadas na Terceira Campanha.

1. Aumento do diâmetro do corpo de prova na região das faces para afastar do núcleo possíveis efeitos de borda;

2. Melhoria do acoplamento entre as faces ensaiadas para melhorar o modo de aquecimento;
3. Aumento da temperatura de ensaio para verificar a ocorrência plena do fenômeno de consolidação entre faces.

2.3 Terceira Campanha

2.3.1 Confeção do Corpo de Prova

Os corpos de prova tiveram sua geometria alterada em relação à Segunda Campanha através do aumento do diâmetro da região das faces de 8 para 12 mm, conforme a Figura 7.

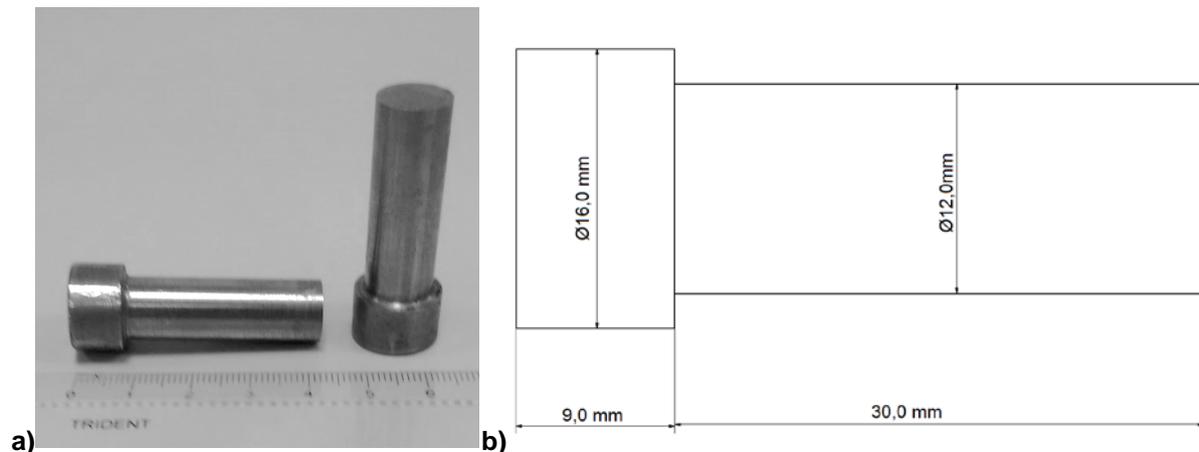


Figura 7. Corpo de prova com contato de 10 mm de diâmetro. a) Fotografia. b) Desenho e dimensões.

Para melhorar o acoplamento inicial dos corpos de prova durante o ensaio, foi melhorado o paralelismo das faces com a base através do faceamento em torno das bases e de uma operação de retifica nas faces de ensaio, com o objetivo de se iniciar o lixamento com lixa de grão 200. Para tornar a operação possível foi confeccionado um dispositivo para auxiliar a estabilização do corpo de prova no equipamento, conforme Figura 8.

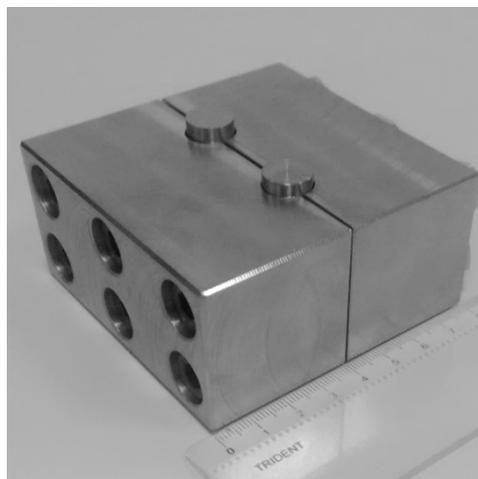


Figura 8. Dispositivo para confecção de corpos de prova.

2.3.2 Procedimento de Consolidação

Não houve alteração na montagem do conjunto em relação à Primeira Campanha, realizada conforme Figura 2.

Em relação à Segunda Campanha, conforme Figura 4, foi alterada somente a temperatura da aplicação da carga a qual foi aumentada para 1185°C.

2.3.3 Ensaios Metalográficos

Após o termino do ensaio, a região transversal ao defeito foi preparada e analisada no microscópio óptico, conforme as Figura 9 e Figura 10.

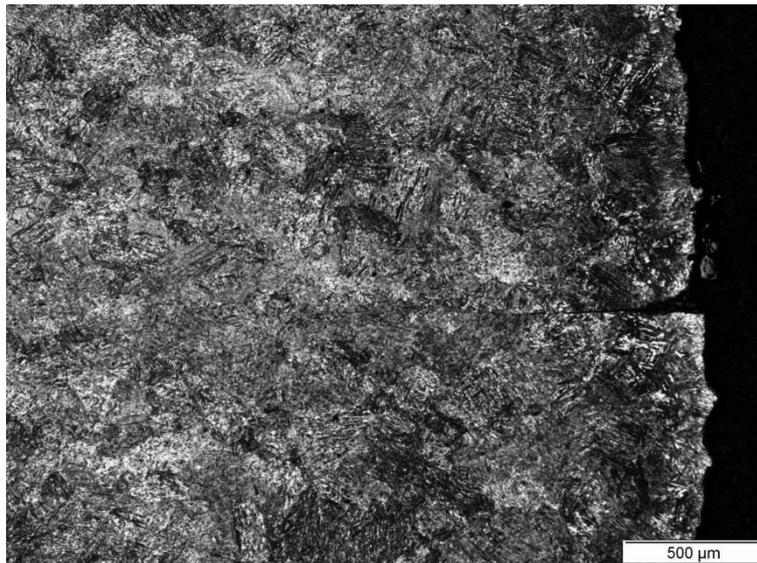


Figura 9. Micrografia da região da borda do corpo de prova ensaiado na Erro! Fonte de referência não encontrada.. Ataque com Nital 2%. Aumento 50x.

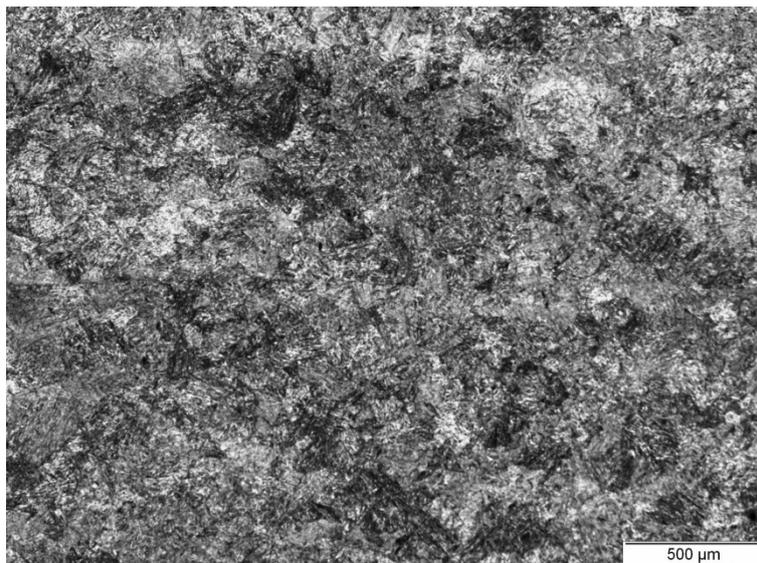


Figura 10. Micrografia da região do núcleo do corpo de prova ensaiado na Erro! Fonte de referência não encontrada.. Ataque com Nital 2%. Aumento 50x.

2.3.4 Resultados da Terceira Campanha

O resultado do ensaio foi satisfatório, pois foi possível verificar que houve a consolidação entre as faces ensaiadas. O defeito de borda foi significativamente reduzido em relação à Segunda Campanha.

3 DEFINIÇÃO DO ENSAIO

Para finalizar a definição do ensaio, foi realizada uma avaliação se o ensaio deveria ser executado por meio de carga aplicada como sugerido no estudo de Afshan et al [6], ou por meio de uma determinada deformação. Chegou-se a conclusão que o ensaio seria mais representativo do processo de conformação mecânica no caso em que a deformação é controlada, visto que no planejamento de um processo de forjamento são definidos parâmetros como a temperatura inicial e o plano de passes, sendo que este último engloba o grau de redução por passe que representa a deformação controlada. A força aplicada durante o processo de conformação mecânica é determinada pelo equipamento, sendo que as condições de atrito, geometria e a resistência do material que determinam a sua distribuição no produto, de forma que é mais conveniente o controle da operação pela deformação.

Tendo em vista esta situação, percebeu-se que calcular a deformação do ensaio de consolidação de vazios não é uma tarefa trivial devido ao estado triaxial de tensão-deformação que o experimento envolve. Dessa forma, utilizou-se a ferramenta de simulação pelo Método de Elementos Finitos (MEF) para correlacionar o deslocamento do ensaio e a deformação efetiva resultante. O software comercial DEFORM™ foi utilizado nesta atividade, de modo que, o ensaio de consolidação foi simulado o mais próximo possível da prática para se obter os valores de deformação efetiva mais próximo possível. A Figura 11 ilustra o início e o final da simulação do ensaio em representação gráfica 3D.

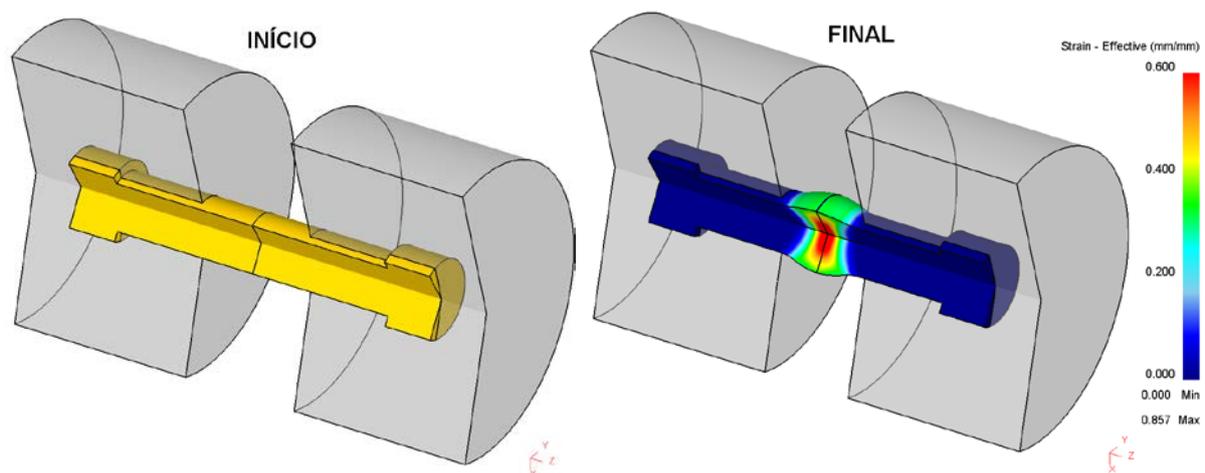


Figura 11. Visão geral da simulação no início do ensaio e no final mostrando o resultado de deformação efetiva.

Analisando o resultado da simulação, observou-se que a deformação efetiva é heterogênea ao longo da superfície de soldagem, então foi definido que o resultado da média aritmética da deformação de quatro pontos localizados próximo à interface conforme mostra a Figura 12 seria utilizada para o cálculo da correlação da deformação com o deslocamento, que está apresentada no gráfico da Figura 13.

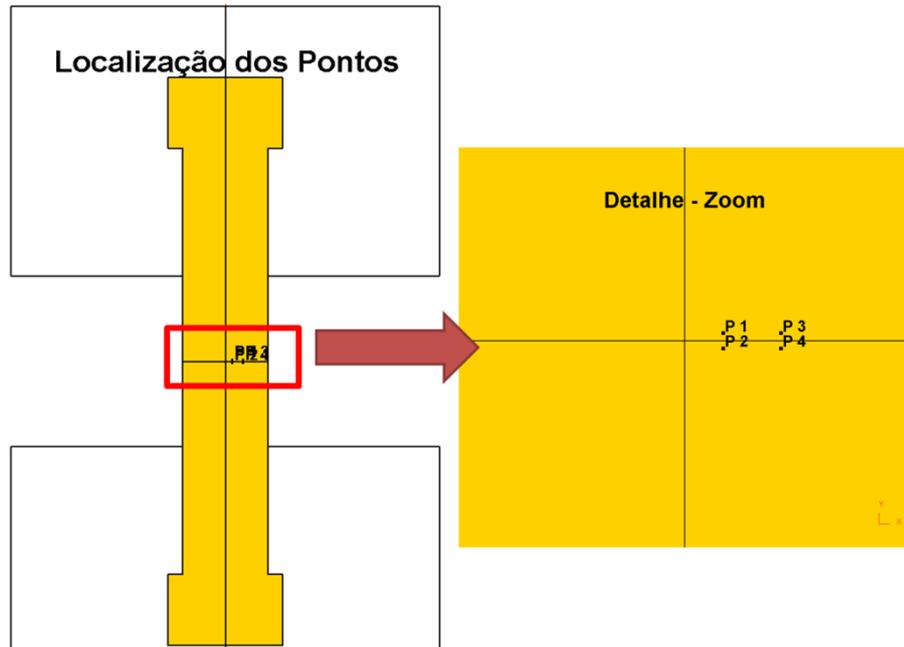


Figura 12. Localização dos pontos para cálculo da média da deformação.

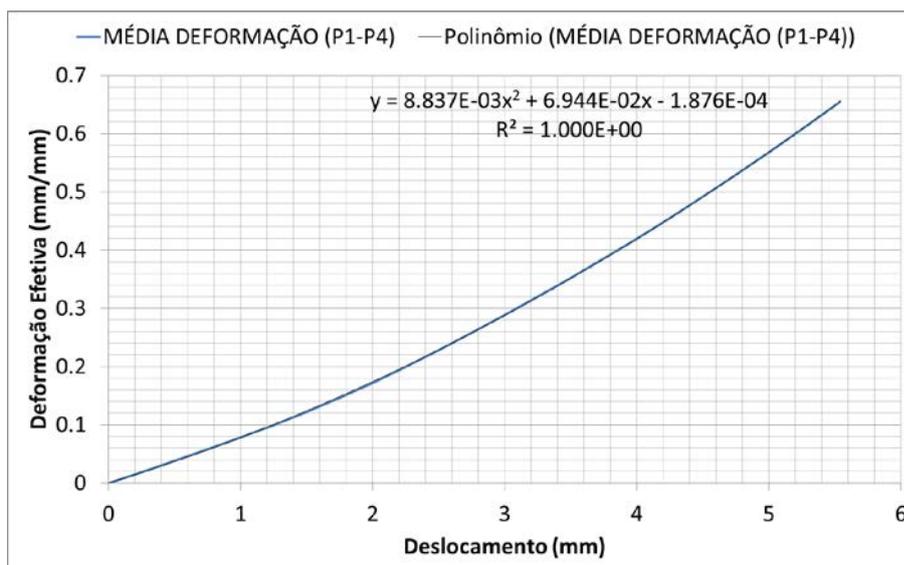


Figura 13. Gráfico resultante da correlação entre deformação e deslocamento para o ensaio de consolidação do fechamento de vazios.

Na Figura 13 também é possível notar que uma curva de um polinômio de segundo grau foi ajustada a correlação e que deverá ser utilizada para a determinação do deslocamento do ensaio.

4 CONCLUSÃO

Mediante os resultados demonstrados pela Terceira Campanha foi possível analisar condições simuladas em que há ocorrência ou não da consolidação do fechamento do vazio. Foi definida uma geometria satisfatória do corpo de prova e seu método de preparação.

Na definição do ensaio, estabeleceu-se que o experimento será controlado pela deformação, mas também é possível controlá-lo por meio da carga controlada, cada modo podendo ser aplicado em uma situação que melhor se assemelhar ao processo a ser simulado fisicamente.

REFERÊNCIAS

- 1 M. Saby, P.-O. Bouchard e M. Bernacki, "Void closure criteria for hot metal forming: A review," *Journal of Manufacturing Processes*. 2015; vol.19; pp. 239-250.
- 2 A. Hill e E. R. Wallach, "Modelling Solid-State Diffusion Bonding," *Acta Metallurgica*. 1989; vol. 37, pp. 2425-2437.
- 3 ASM International, *ASM Metals HandBook*, 9ª ed., Vol. 6 - Welding, Brazing, and Soldering, 1993.
- 4 B. Derby e E. R. Wallach, "Diffusion bonding: development of theoretical model," *Metal Science*. 1984; vol. 18, pp. 427-431.
- 5 G. H. Gessinger, *Powder Metallurgy of Superalloys*, 1ª ed., Cambridge: Butterworth-Heinemann, 1984.
- 6 S. Afshan, D. Balint, D. Farrugia e J. Lin, "A new experimental method for identifying the conditions necessary for diffusion bonding in free cutting steels," *Materials Science and Engineering A*. 2013; vol. 586, pp. 25-30.
- 7 S. Li, M. Sun, H. Liu e D. Li, "Study on void healing behavior during forging process for 25Cr2Ni4MoV steel," *Acta Metallurgica Sinica*. 2011; vol. 47, pp. 946-953.
- 8 Villares Metals S.A., [Online]. Available: http://www.villaresmetals.com.br/division_stahl/content/download/39396/452866/file/VP20ISO%202015.pdf. [Acesso em 02 07 2018].