

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALURGICA
E DE MATERIAIS - PPGE3M

THOMAS GOMES DOS SANTOS

**ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE FORJAMENTO A QUENTE
COM MÁSCARAS METÁLICAS**

Porto Alegre

2019

THOMAS GOMES DOS SANTOS

**ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE FORJAMENTO A
QUENTE COM MÁSCARAS METÁLICAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais.

Área de concentração: Processos de fabricação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer

Porto Alegre

2019

THOMAS GOMES DOS SANTOS

ANÁLISE TÉRMICA DO PROCESSO DE FORJAMENTO A
QUENTE COM MÁSCARAS METÁLICAS

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas Metalúrgica e de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer, UFRGS

Doutor pela RWTH Aachen University -Aachen, Alemanha.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alberto Morreira Guerreiro Brito, UFRGS

Doutor pela UFRGS– Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Carlos Roberto Cauduro, UFSM

Doutor pela UFRGS– Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Eduardo Cristiano Milke, IFSul

Doutor pela UFRGS– Porto Alegre, Brasil.

Coordenador do PPGE3M:

Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre, março de 2019.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, por ter priorizado minha educação em todos os momentos, ao meu pai que mesmo não estando vivenciando está de alguma forma está aqui presente. A minha filha Leandra Beatriz, fonte de toda minha força nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus por minha vida, família e amigos.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por proporcionar um ensino público de qualidade e de alto impacto científico.

Ao PPGE3M por proporcionar essa experiência de pesquisa a qual participei nestes últimos anos para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer pelo imenso apoio, confiança e dedicação para a elaboração deste trabalho.

Agradeço a minha mãe Ilva da Rosa Gomes, pela criação e ensinamentos mesmo com dificuldades. Obrigado meus irmãos, que nos momentos difíceis estavam comigo.

A minha irmã Sabrina Gomes de Medeiros, pelo apoio, por acreditar e lutar junto nesta jornada de minha vida.

Obrigado! Primos e tias pela contribuição valiosa, em especial a minha tia Maria Ivone pelo enorme apoio dedicado na concretização deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

O presente trabalho descreve as pesquisas que tiveram como objetivo a análise térmica do processo de forjamento a quente com proteção de máscaras metálicas (die masks). Como material base, o aço AISI 1045 foi utilizado nas geratrizes, o aço AISI H13 nas matrizes e o aço DIN 22MnB5 nas máscaras metálicas. Além disso, diferentes materiais interfaciais também foram considerados durante os experimentos, isto é, tratamento de nitretação e lubrificante. Considerando uma geometria axissimétrica, foram realizados experimentos para comparar o perfil de temperatura e definir a influência térmica dos materiais e suas configurações. Além disso, com base nas características físicas e mecânicas dos materiais, foi proposto um modelo numérico de transferência de calor entre os materiais da geratriz e da matriz. O valor da resistência térmica do contato foi utilizado na simulação numérica do processo de forjamento e os resultados foram utilizados para determinar o impacto térmico do uso de máscaras metálicas como camada protetora no processo de forjamento a quente. Observou-se que em matrizes submetidas ao tratamento de nitretação de superfície, o perfil térmico apresenta ligeira diferença quando comparado a matrizes sem tratamento. Além disso, verificou-se que o uso de diferentes materiais interfaciais influencia diretamente a carga térmica nas matrizes. Nos experimentos, verificou-se que o uso de pó de grafite como lubrificante resulta em maior carregamento térmico na matriz. Por fim, com base nos resultados alcançados, é possível destacar que o uso de máscaras metálicas como proteção resulta em uma diminuição do carregamento térmico nas matrizes. Foi registrada uma redução de 51% na temperatura na matriz de forjamento, quando comparada aos conjuntos sem o uso de máscaras metálicas como método de proteção.

Palavras-chaves: Forjamento; Coeficiente de transferência de calor interfacial; Máscaras metálicas; Conformação mecânica; Condutância térmica de contato.

ABSTRACT

The present work describes the research that had as objective the thermal analysis of the hot forging process with protection of metallic masks (die masks). As a base material, AISI 1045 steel was used for the billets, AISI H13 steel for the dies and DIN 22MnB5 steel for the metallic masks. Furthermore, different interfacial materials were also considered during the experiments, i.e. nitriding treatment and lubricant. Considering an axisymmetric geometry, experiments were performed to compare the temperature profile and to define the thermal influence of the materials and their configurations. Additionally, based on the physical and mechanical characteristics of the materials a heat transfer numerical model between the materials of the billet and die was proposed. The contact thermal conductance value was used in the numerical simulation of the forging process and the results were used to determine the thermal impact of the use of metallic masks as protective layer in the hot forging process. It was observed that in dies subjected to surface nitriding treatment, the thermal profile presents slight difference when compared to dies without treatment. Furthermore, it was found that the use of different interfacial materials directly influences the thermal loading in the dies. In the experiments it was found that the use of graphite powder as lubricant results in higher thermal load in the die. Lastly, based on the achieved results, it is possible to point out that the use of metallic masks as a protection results in a thermal load decrease in the dies. A 51% reduction in temperature was recorded in the forging die when compared to sets without the use of metallic masks as protection method.

Keywords: Forging; Heat transfer coefficient; Metal masks; Metalforming; Thermal contact conductance.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	IV
AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
SUMÁRIO	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 FORJAMENTO.....	4
2.2 AÇOS PARA MATRIZES DE FORJAMENTO A QUENTE	11
2.2.1 Falhas Em Matrizes de Forjamento.....	17
2.3 TEMPERATURA E TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO FORJAMENTO	25
2.3.1 Geração e Transferência de Calor	26
2.3.2 Transferência de Calor Interfacial.....	31
2.3.3 Mecanismo de Transferência de Calor em Superfícies em Contato	32
2.4 MEDIDA DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR INTERFACIAL	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELO TEMPO DE CONTATO ...	40
3.2 TESTES DE FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA.....	45
3.2.1 Materiais Utilizados.....	51
3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	53
3.4 MODELO NUMÉRICO EM ELEMENTOS FINITOS	54
3.4.1 Estrutura do Modelo Em Elementos Finitos (FEM) e Parâmetros de Simulação	54
3.4.2 Modelo Numérico Para o Teste de Transferência de Calor Pelo Tempo de Contato	54
3.4.3 Modelo numérico para o teste de forjamento a quente	60
3.4.4 Estrutura da Estratégica de Otimização	63
4 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	65
4.1 MODELOS FÍSICOS.....	65
4.1.1 Teste de transferência de calor pelo tempo de contato.....	65
4.1.2 Teste experimental de forjamento a quente	72
4.2 MODELOS NUMÉRICOS.....	78
4.2.1 Análise inversa do teste de transferência de calor pelo tempo de contato... 78	
4.2.2 Modelo inverso do processo de forjamento a quente em matriz aberta	85
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	90
5.1 TESTES EXPERIMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELO TEMPO DE CONTATO	90
5.2 MODELOS NUMÉRICOS.....	94
5.3 FATORES A SEREM OBSERVADOS.....	96
5.4 DETERMINAÇÃO DO HTC ATRAVÉS DOS MODELOS INVERSOS.....	96
6 CONCLUSÕES.....	98
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	99
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Abordagem utilizada neste trabalho.....	3
Figura 2. Geometrias conformadas em diferentes etapas de forjamento. (Balancin, 2015).....	4
Figura 3. Compressão uniaxial de cilindro, a esquerda é apresentada os valores de deformação verdadeira para a simulação numérica computacional.	5
Figura 4. Forjamento em matriz fechada. (Schuler, 1998).....	6
Figura 5. Influência da quantidade de trabalho a frio sobre o comportamento tensão deformação de um aço baixo carbono. Adaptado de (Metals Handbook, 1990).....	8
Figura 6. Efeito da temperatura de trabalho sobre a forjabilidade e propriedades, para diferentes materiais forjados. Adaptado de (Schuler , 1998)	10
Figura 7. Dureza a quente dos aços AISI ferramenta para trabalho a quente, mantidos a 30 min. nas temperaturas. Adaptado de (Metals Handbook, 1989)	13
Figura 8. Tratamento térmico de aços ferramenta para trabalho a quente. Adaptado de (Deshpande, et al., 2011)	14
Figura 9. Resistência de um aço a deformação plástica a elevada temperatura, valores em parênteses indicam a dureza “Rockwell C” na temperatura ambiente. Adaptado de (Metals Handbook, 1989)	15
Figura 10. Resistência de um aço a deformação plástica a elevada temperatura, valores em parênteses indicam a dureza “Rockwell C” na temperatura ambiente. Adaptado de (Metals Handbook, 1989)	16
Figura 11. Classificação das causas de falhas em matrizes. Adaptado de (Chander, et al., 2016).....	18
Figura 12. Mecanismos de falha em matrizes de forjamento. Adaptado de (Lange, <i>et al</i> 1992)	19
Figura 13. Ciclo térmico em uma matriz de forjamento a quente em uma prensa mecânica. Adaptado de (Altan & Shirgaokar, 2007).....	20
Figura 14. Camada nitretada em um aço ferramenta. (Santaella, 2009)	22
Figura 15. Funções particulares da camada superficial PVD. Adaptado de (Altan, et al., 2007)	23
Figura 16. Análise da dureza a quente com a aplicação superficial SiAlON em um aço ferramenta H13 comparando com materiais similares. Adaptado de (Altan, et al., 2007).....	24
Figura 17. Conceito da aplicação de máscaras; a) posicionamento da geratriz e configuração, b) forjamento sobre a máscara e c) remoção de máscaras das matrizes. Adaptado de (Rosenstock, 2015)	25
Figura 18. Redução da amplitude térmica e do pico de temperatura na superfície durante 10 ciclos de forjamento. Adaptado de (Haußmann, 2015)	25
Figura 19. Representação esquemática do estado térmico de um corpo sendo forjado. (Polozine, 2009)	26
Figura 20. Transferência de calor entre interface entre sólidos. (Baskharone, 2012)	31

Figura 21. Vista esquemática da transferência de calor entre dois corpos em contato. Adaptado de (Madhusudana, 2014).....	32
Figura 22. Queda de temperatura na interface de sólidos em contato. (Mantelli, et al., 2002)	33
Figura 23. Variação da resistência de contato para diferentes fluidos. Adaptado de (Bardon, 1988).....	35
Figura 24. Montagem e fixação do termopar tipo J na superfície da matriz de forjamento. Adaptado de (Chang, et al., 2016).....	Erro! Indicador não definido.
Figura 25. Dimensões do dispositivo de transferência de calor e as respectivas posições do termopar. Adaptado de (Chang, <i>et al</i> 2016)	38
Figura 26. Configuração utilizada para a medição da temperatura. Adaptado de (Bai, et al., 2012).....	38
Figura 27. Fluxograma da metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.	40
Figura 28. Geometria simplificada definida para os ensaios de transferência de calor pelo tempo de contato.....	41
Figura 29. Geometria dos corpos de prova utilizados para a análise da transferência de calor pelo tempo de contato com os índices dos respectivos termopares, a) geratriz e b) matriz.	42
Figura 30. Configuração utilizada nos testes de transferência de calor pelo tempo de contato, a) sem máscaras de proteção e b) com máscara de proteção.....	42
Figura 31. Visualização esquemática das etapas do teste de transferência de calor pelo tempo de contato.....	43
Figura 32. Detalhe da configuração utilizada no teste com meio interfacial.	44
Figura 33. Geometria da chapa de aço utilizada como meio interfacial no teste de transferência de calor pelo tempo de contato.	45
Figura 34. a) Esquema do teste de forjamento, posição inicial e final de forjamento, b) componentes.	46
Figura 35. Prensa EKA utilizada nos experimentos de forjamento.....	47
Figura 36. Matriz inferior instrumentada com termopares tipo K.....	48
Figura 37. Modelo esquemático das etapas dos testes de forjamento.	48
Figura 38. Detalhe do local de medição da temperatura.	49
Figura 39. Posições de medição da temperatura, a) matriz e b) geratriz.	50
Figura 40. Configuração utilizada nos experimentos de forjamento.....	53
Figura 41. Perfil de temperatura e partes segmentadas no teste de transferência de calor para o experimento com contato direto em matriz temperada.	55
Figura 42. Perfil de temperatura da amostra no final do transporte.	57
Figura 43. Modelo de transferência de calor pelo tempo de contato no estado inicial de simulação.....	58
Figura 44. Modelo numérico após ser importado do processo de transporte a) sem máscara e b) com máscara, no tempo $t=0$ do processo de transferência de calor.	59
Figura 45. Segmentos do modelo físico para o caso do experimento de forjamento sem uso de máscaras.....	61
Figura 46. Estratégia aproximação utilizada nos modelos de otimização.....	63
Figura 47. Posições das partículas utilizadas no modelo numérico para o teste de transferência de calor pelo tempo de contato.	64

Figura 48. Perfil de temperatura para o teste de transferência de calor pelo tempo de contato para o caso de transferência com contato direto com matriz sem tratamento superficial.	65
Figura 49. Perfil térmico para o caso com o uso de matrizes nitretadas e por contato direto. .	66
Figura 50. Perfil térmico amortecido no teste de transferência de calor com o uso de grafite como material interfacial.	67
Figura 51. Perfil térmico de teste com o uso de Lubrodal como meio interfacial.....	67
Figura 52. Perfil térmico do teste com o uso de Al ₂ O ₃ como meio interfacial.	68
Figura 53. Perfil térmico do teste de transferência de calor com o uso de máscara metálica. .	69
Figura 54. Comparativo das temperaturas na matriz no ponto M01.	70
Figura 55. Comparativo térmico nos testes realizados para a superfície das matrizes para o ponto M01.	71
Figura 56. Histórico de temperatura registrado durante a execução dos testes experimentais.	72
Figura 57. Histórico de temperatura na geratriz durante o teste de forjamento sem o uso de máscara metálica.....	73
Figura 58. Perfil de temperatura monitorada para a geratriz no experimento de forjamento sem o uso de máscaras metálicas.	74
Figura 59. Histórico de temperatura registrado no teste de forjamento com máscaras metálicas.	75
Figura 60. Histórico da temperatura na geratriz durante o teste de forjamento com o uso de máscaras metálicas.	76
Figura 61. Histórico de temperatura registrado nas matrizes e máscara durante o teste de forjamento com o uso de máscaras metálicas.....	77
Figura 62. Temperatura nos pontos Mi01 e Mi02 da matriz inferior durante testes com e sem o uso de máscaras.	78
Figura 63. Valores de temperatura no ponto M01.....	79
Figura 64. Temperatura no ponto B01, no teste de transferência de calor sem o uso de máscaras.....	80
Figura 65. Valores do HTC obtidos pelo modelo inverso em função da temperatura da geratriz.	81
Figura 66. Valores de temperatura no ponto M01 para o teste com o uso de máscaras.....	82
Figura 67. Temperatura no ponto B01 da geratriz, no teste de transferência de calor com uso de máscaras.....	83
Figura 68. Temperatura no ponto MS01 na máscara.....	84
Figura 69. Coeficiente de transferência de calor entre geratriz /máscara.....	84
Figura 70. Comparação entre os valores de temperatura obtidos pelo modelo inverso.	85
Figura 71. Valores de temperatura do modelo inverso e experimental para o ponto Mi01.	86
Figura 72. Valor obtido pelo modelo inverso para o coeficiente de transferência de calor para o forjamento sem máscara entre a matriz e geratriz.	87
Figura 73. Comparação entre os valores experimentais e simulacionais obtidos para o caso do forjamento com o uso de máscaras metálicas.....	88
Figura 74. Valores de temperatura para o ponto Masc e Mi01.	89
Figura 75. Valor obtido pelo modelo inverso para o HTC entre geratriz e máscara.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Materiais utilizados nos testes de transferência de calor pelo tempo de contato.....	44
Tabela 2. Dados de teste de forjamento.....	46
Tabela 3. Composição química do aço AISI H13 em teor em peso %. (Metals Handbook, 1989).....	51
Tabela 4. Composição química do aço AISI 1045 em teor em peso%.(Metals Handbook, 1990).....	51
Tabela 5. Parâmetros da equação de Hansel-Spittel, para o aço C45_h1.....	52
Tabela 6. Composição química do aço DIN 22MnB5 em teor em peso %.(Spittel, et al., 2009).....	52
Tabela 7. Parâmetros de simulação utilizados em todos os modelo numéricos realizados.....	55
Tabela 8. Parâmetros de simulação utilizados no modelo de transporte.....	56
Tabela 9. Parâmetros utilizados nos modelos de transferência de calor pelo tempo de contato.....	59
Tabela 10. Parâmetros utilizados no modelo numérico do processo de forjamento em matriz aberta.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS

A - Área nominal de contato.....	[m ²]
A_{conv} - Área da superfície convectiva.....	[m ²]
A_{rad} - Área da superfície irradiante.....	[m ²]
C_p - Calor específico do material.....	[J/kg*K]
$E(T)$ - Poder emissivo total da superfície real na temperatura T.....	[W/m ²]
$E_b(T)$ - Poder emissivo total da superfície do corpo negro na temperatura T.....	[W/m ²]
$E_{b\lambda}(\lambda, T)$ -Poder emissivo monocromático da superfície do corpo negro na temperatura T.....	[W/m ²]
F_C - Equivalente mecânico do calor.....	[778 pés-lb/Btu]
h_c - Condutância térmica de contato.....	[W/m ² *K]
h_{conv} - Coeficiente de transferência de calor por convecção.....	[W/m ² *K]
k - Condutividade térmica.....	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
k_f - Tensão de escoamento do material.....	[MPa]
q_{rad} - Calor radiante líquido transferido de superfície por unidade de tempo.....	[W]
Q - Fluxo total de calor.....	[W*m ⁻²]
Q_s - Fluxo de calor através dos pontos sólidos.....	[W*m ⁻²]
Q_g - Fluxo de calor entre o gás intersticial.....	[W*m ⁻²]
T - Temperatura.....	[°C]
T_A - Temperatura instantânea das matrizes.....	[°C]
T_w - Temperatura inicial do material a ser forjado.....	[°C]
T_∞ - Temperatura ambiente.....	[°C]
U_p - Trabalho de deformação plástica por unidade de volume.....	[J/mm ³]
V - Volume do material a ser forjado.....	[mm ³]

SÍMBOLOS GREGOS

ϑ_D	- Aumento de temperatura devido a deformação plástica.....	[K ou °C]
ϑ_C	- Queda de temperatura convectiva entre o meio.....	[°C]
ϑ_F	- Aumento de temperatura devido ao atrito interfacial.....	[°C]
ϑ_T	- Queda de temperatura entre a interface matriz/geratriz.....	[°C]
ϑ_R	- Queda de temperatura pela radiação com o meio.....	[°C]
φ	- Deformação verdadeira;	
μ	- Coeficiente de atrito;	
β	- Fração de energia transformada em calor;	
v	- Velocidade interfacial entre matriz/geratriz.....	[mm/s]
ε_g	- Coeficiente de emissividade geratriz	
ε_m	- Coeficiente de emissividade máscara.	
ε_d	- Coeficiente de emissividade matriz	
ε_T	- Coeficiente de emissividade total da superfície real na temperatura T;	
$\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$	- Proporção de radiação emitida por superfícies iguais na mesma temperatura T, do corpo real e do corpo negro, em relação ao corpo negro, para o comprimento de onda λ ;	
λ	- Comprimento da onda emitida da superfície examinada.....	[m]
ρ	- Densidade do material.....	[kg/m ³]
σ	- Constante de Stefan-Boltzman.....	[w/m ⁻² *k ⁻⁴]
ΔT	- Diferença entre as temperaturas nas superfícies.....	[°C]

ABREVIATÖES

Cp – Corpo de prova

CTC – Coeficiente de transferência térmica.....[W/m*K]

CVD – Chemical vapour deposition

HTC – Heat transfer coefficient.....[W/m*K]

IHTC – Interstitial heat transfer coefficient.....[W/m*K]

PVD – Physical vapor deposition

RTC – Resistência térmica de contato.....[m²*K/W]

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - American Society for Testing and Materials.

1 INTRODUÇÃO

O processo de forjamento é, atualmente, um dos processos de maior uso na indústria. Popularidade ocorre muitas vezes em virtude do aumento na resistência mecânica imposta durante o processo. Deste modo, têm-se essa como uma das características de maior relevância para a utilização deste processo de fabricação. O processo de forjamento a quente possui como característica a capacidade de produzir peças com formato complexo e geometria próxima à geometria final do produto acabado (Junior, 2010).

O forjamento a quente, em virtude de o material estar em uma temperatura a qual ocorre o fenômeno de recristalização do material, necessita de menos energia mecânica quando comparado ao processo de conformação a frio. A temperatura de processo concede ao material comportamento altamente dúctil, possibilitando assim elevadas deformações.

A solicitação de uma produção contínua e ininterrupta é de extrema importância. Desta forma, a vida do ferramental de conformação afeta diretamente nos custos operacionais do processo. O custo da matriz engloba cerca de 30% do custo total em um processo de forjamento a quente em matriz fechada (Magri, 2011). Portanto qualquer variação no tempo de vida do ferramental de forjamento pode influenciar diretamente nos custos produtivos.

As matrizes de forjamento a quente, em operação, estão sujeitas a severos carregamentos termomecânicos. Isto ocorre devido às temperaturas de processo serem elevadas. Por exemplo, para os aços liga, as temperaturas de processo estão na ordem de 1000 e 1500°C (Filho, 2003). Igualmente relevante, o carregamento mecânico necessário para conformar os componentes são na ordem de 10000 a 70000N em sua maioria. Este carregamento termomecânico age negativamente nas superfícies das matrizes de forjamento, reduzindo drasticamente seu tempo de vida.

Como alternativa para reduzir os carregamentos atuantes nas matrizes, propôs-se o uso de insertos sobrepostos sobre a cavidade das matrizes (Rosenstock, 2015). Espera-se que tais insertos suportem a maior parte dos carregamentos mecânicos e térmicos, reduzindo assim os mecanismos de desgastes, os quais são danosos a matriz de forjamento (Costa *et al* 2016).

Entender o efeito das variáveis envolvidas no processo de forjamento é de extrema importância a fim de se obter sucesso e avanço tecnológico na indústria (Farias, 2017). Neste contexto, torna-se imprescindível compreender os impactos da aplicação de máscaras ou insertos metálicos como mecanismo de proteção as matrizes de forjamento.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o impacto da aplicação das máscaras metálicas no carregamento térmico em matrizes de forjamento a quente, demonstrando sua real

eficácia e influências no processo. Para isso, através de medidas de temperatura em pontos específicos na matriz de forjamento, foram determinados e comparados os coeficientes de transferência de calor interfacial para o caso com uso e sem uso de máscaras.

OBJETIVO: Realizar uma análise térmica do processo de forjamento a quente com e sem o uso de máscaras metálicas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Criar um modelo de transferência de calor simplificado;
- Realizar experimentos de transferência de calor em escala para o processo de forjamento com diferentes materiais interfaciais;
- Avaliar o efeito de diferentes matérias interfaciais no perfil térmico imposto sobre as matrizes de forjamento;
- Realizar experimentos de forjamento com e sem o uso de máscaras metálicas;
- Utilizar a ferramenta de otimização e aproximação do software de simulação numérica Simufact Forming© para extrair os coeficientes de transferência de calor para modelos utilizados.

O método abordado neste trabalho visando avaliar a influência do processo de forjamento com e sem o uso de máscaras é apresentado na Figura 1.



Figura 1. Abordagem utilizada neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FORJAMENTO

O forjamento teve seu início por volta de 4000 a 8000 anos A.C; e sendo uma das mais antigas operações de trabalho, é um processo em que a matéria-prima a ser trabalhada é submetida a forças de compressão aplicadas através de matrizes ou ferramentas.

Dieter (1986) define forjamento como a transformação de metais de uma forma bruta em uma forma acabada, ou pré-acabada, através da prensagem ou martelagem. Este é um processo no qual a matéria-prima, normalmente possuindo formato simples, é conformada de modo a possuir em seu estágio final formatos variados e complexos. A Figura 2 apresenta exemplos de um componente forjado em sequência.



Figura 2. Geometrias conformadas em diferentes etapas de forjamento. (Balancin, 2015)

Dentre as principais características dos materiais forjados podem ser destacadas as excelentes propriedades mecânicas, o peso, e a elevada resistência a fadiga e ao impacto (Rodrigues, et al., 2005). Os produtos forjados apresentam uma microestrutura homogênea e com propriedades mecânicas superiores as propriedades iniciais da matéria prima utilizada (Schaeffer, 2006).

O processo de forjamento pode ser classificado em dois grupos principais, conforme o tipo de ferramenta utilizada, sendo:

- Forjamento em matriz aberta;
- Forjamento em matriz fechada.

Forjamento em matriz aberta

O processo de forjamento em matriz aberta é definido quando o material é conformado entre duas matrizes de geometria relativamente simples as quais aplicam a força de compressão em regiões localizadas da peça. As principais vantagens do processo de forjamento em matriz aberta são:

- Baixo custo de ferramental;
- Possibilidade de ser aplicado em peças com grandes dimensões;
- Versatilidade de aplicações.

As principais limitações do processo de forjamento em matriz aberta são:

- Apenas aplicado a formas geométricas simples;
- Baixas tolerâncias dimensionais;

Normalmente o forjamento em matriz aberta é realizado para a produção de pré-formas para um posterior forjamento em matriz fechada. A operação de recalçamento de cilindros é a operação de forjamento em matriz aberta mais comum, podendo ser observada conforme a Figura 3.

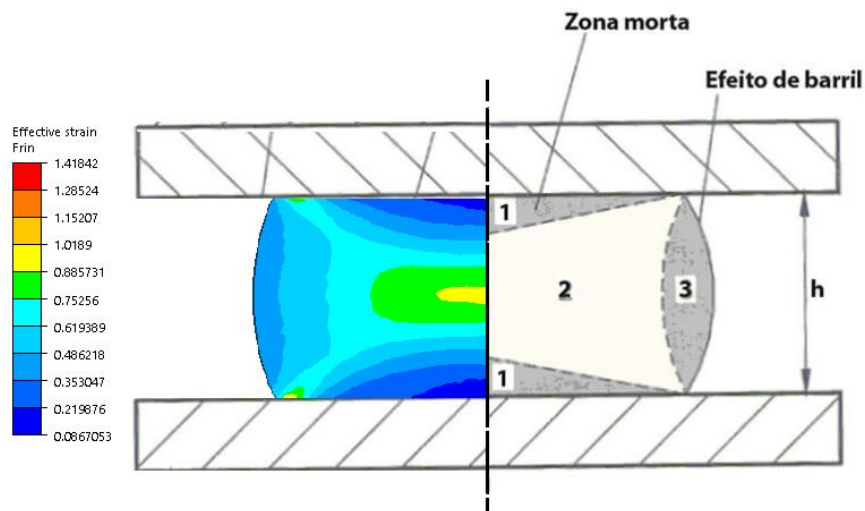


Figura 3. Compressão uniaxial de cilindro, a esquerda é apresentada os valores de deformação verdadeira para a simulação numérica computacional.

Na Figura 3 podem ser observadas as regiões presentes na execução do recalçamento de um corpo de prova cilíndrico entre matrizes planas. O formato barril, típico do corpo de prova

ao final do processo, é originado em função das forças de atrito entre as interfaces de contato matriz/geratriz. A região “1” corresponde à região onde não ocorre deformação plástica em virtude das forças de atrito e a região “2” é onde ocorrem às maiores deformações.

No forjamento a quente, o efeito barril pode ser influenciado pelo gradiente térmico entre a geratriz e as matrizes. Esta região normalmente está a uma temperatura inferior (salvo no forjamento isotérmico), devido às perdas de calor da superfície externa do material para o ambiente. Portanto, a região externa da geratriz se encontra a uma temperatura inferior ao núcleo o qual sofrerá maiores deformações do que o material na superfície exterior.

Forjamento em matriz fechada

Denomina-se forjamento em matriz fechada quando o material a ser conformado é completamente envolto pela matriz de forjamento, podendo assim se obter geometrias de maior complexidade. No forjamento em matriz aberta o material escoava de forma livre enquanto no forjamento em matriz fechada o escoamento do material é restrito pelas cavidades das matrizes de forjamento (Rodrigues, et al., 2005).

No forjamento em matriz fechada a rebarba possui grande importância no processo. Esta assume diversas funções como restringir o fluxo de material, forçando a preencher totalmente as cavidades das matrizes; regular as tensões do processo sobre a matriz; além de permitir que o excesso de material escoe para fora da cavidade da matriz.

O processo de forjamento em matriz fechada pode ser classificado em dois grupos:

- Forjamento convencional, destinado na produção de peças com um grau de tolerância mais amplo.
- Forjamento de precisão, destinado à produção de peças na forma final ou quase final (near net-shape), com tolerâncias geométricas mais rigorosas

Na Figura 4 é ilustrado um exemplo de forjamento em matriz fechada.

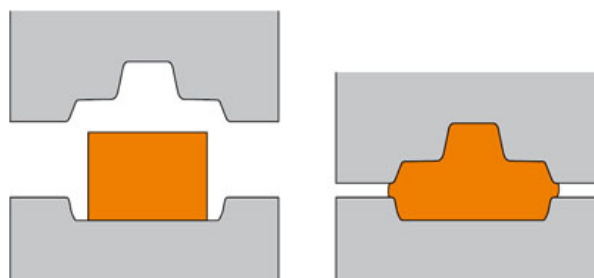


Figura 4. Forjamento em matriz fechada. (Schuler, 1998)

O processo de forjamento também pode ser classificado sob diferentes fatores, entre os quais, de maior relevância para este estudo, a temperatura de trabalho na qual a conformação é realizada. Desta forma, o processo de forjamento pode ser caracterizado como a frio, a morno e a quente.

A determinação da temperatura ideal para se conformar um dado material deve ser definida considerando o tipo de aço utilizado, observando, por exemplo, zonas de fragilização. Também deve-se considerar um equilíbrio entre os esforços de conformação e a formação das camadas oxidadas em consequência das altas temperaturas.

Forjamento a Frio

O processo de forjamento a frio é realizado em uma temperatura abaixo da temperatura de recuperação do material (Metals Handbook, 1989). Os produtos produzidos por forjamento a frio apresentam alta precisão dimensional, além de necessitar pouco ou nenhum trabalho de acabamento. Em vista disso, outra vantagem presente no forjamento a frio é a significativa economia de material.

O trabalho a frio em um material provoca um aumento de sua resistência mecânica devido ao encruamento. Entretanto, também há redução de sua ductilidade tornando muitas vezes necessários tratamentos térmicos intermediários no aço para atingir um determinado valor de deformação. A influência da quantidade de trabalho a frio sobre o comportamento tensão deformação de um aço baixo carbono é ilustrada na Figura 5.

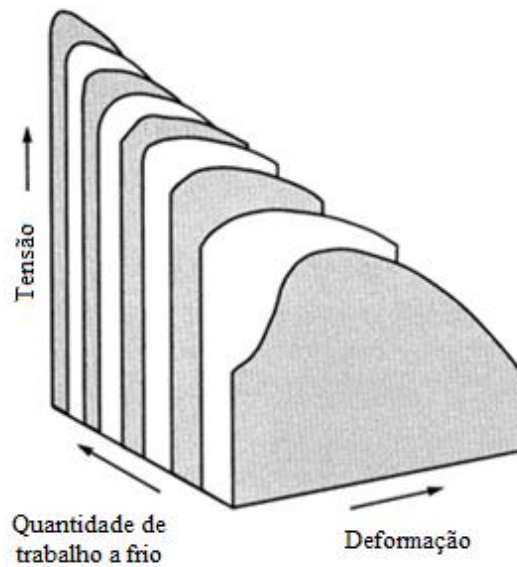


Figura 5. Influência da quantidade de trabalho a frio sobre o comportamento tensão deformação de um aço baixo carbono. Adaptado de (**Metals Handbook, 1990**)

Como desvantagem do forjamento a frio, pode ser citado, as altas forças necessárias para conformar o metal. Desta forma, os níveis de deformações possíveis são limitados. Outro fato que dificulta o trabalho a frio é a dificuldade de trabalhar ligas com baixa ductilidade e alta susceptibilidade ao endurecimento por deformação. Esta dificuldade torna necessário tratamentos intermediários de recozimento a fim de alcançar altas taxas de deformações.

Forjamento a Morno

O processo de forjamento a morno ocorre em uma faixa de temperaturas onde em determinadas condições usufrui-se tanto das vantagens do forjamento a frio, como as do forjamento a quente. No processo a morno podem ser produzidos produtos com geometrias complexas, melhores propriedades mecânicas e menores custos. No processo a morno se destaca a precisão geométrica que pode ser atingida.

A temperatura de trabalho para o processo a morno deve ser determinada considerando as temperaturas de fragilização ao azul e ao vermelho do material. Normalmente, evitam-se temperaturas inferiores a 500°C e superiores a 900°C, podendo variar conforme as características de cada material (Metals Handbook, 1989).

Forjamento A Quente

O processo de forjamento a quente possui como principal característica a realização do processo acima da temperatura onde ocorre o fenômeno de recuperação e recristalização do material (Metals Handbook, 1989). Devido a isto, são necessárias menores forças para deformar o material quando comparado com o processamento a frio ou a morno. No processo de forjamento a quente, a recristalização do material ocorre simultaneamente com o encruamento. Esta ação simultânea provoca uma redução do efeito negativo do encruamento sobre as propriedades mecânicas do material. O trabalho a quente ocorre a uma tensão essencialmente constante. Também, como a tensão de escoamento plástico decresce com o aumento da temperatura, a energia necessária para a deformação é geralmente muito menor para o trabalho a quente do que para o trabalho a frio.

Entretanto, o trabalho a quente apresenta algumas desvantagens. Devido ao fato de geralmente utilizarem-se temperaturas elevadas, as reações superficiais entre o metal e a atmosfera tornam-se problemáticas. É comum realizar o trabalho a quente ao ar e uma ocorrência inevitável é o surgimento de uma camada superficial oxidada. Tal camada pode gerar perdas de quantidades consideráveis de material. Na Figura 6, pode ser observada a influência da temperatura nas características de diferentes metais, assim como a espessura da camada de óxido sobre a superfície do metal.

É importante compreender que a diferença entre o trabalho a frio e o trabalho quente não depende de nenhuma temperatura de deformação arbitrária. Para a maioria das ligas comerciais uma operação de trabalho a quente deve ser realizada a uma temperatura relativamente elevada, de forma que se obtenha uma rápida taxa de recristalização (Dieter, 1986).

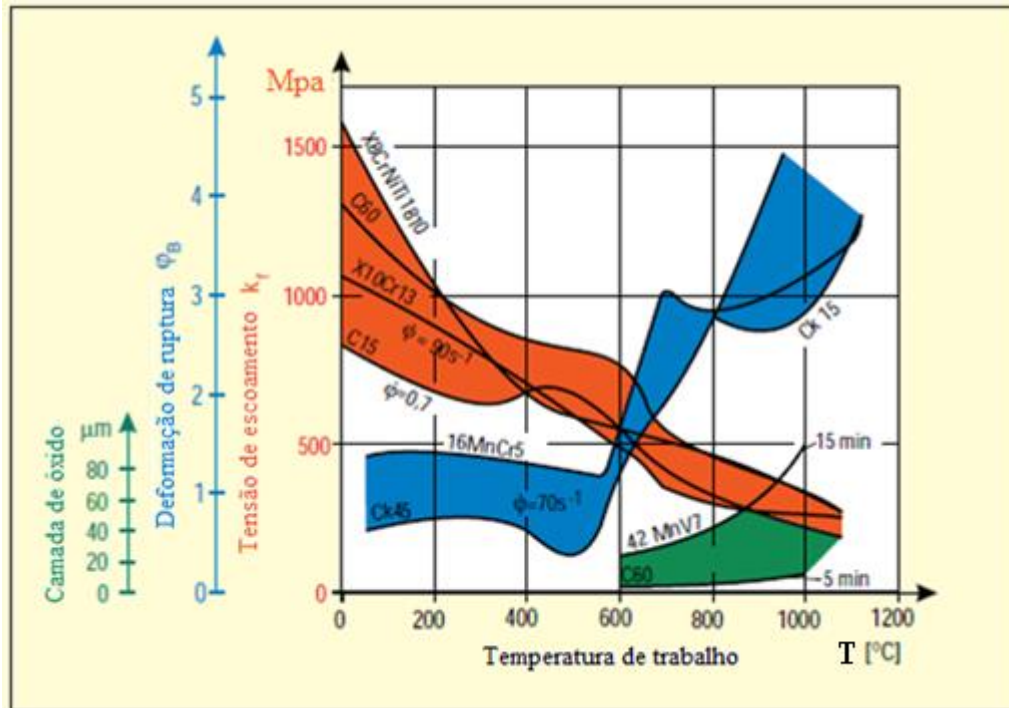


Figura 6. Efeito da temperatura de trabalho sobre a forjabilidade e propriedades, para diferentes materiais forjados. Adaptado de (Schuler, 1998)

O aumento de resistência da peça no trabalho a quente é devido principalmente a microestrutura final do material que tende a apresentar uma fluidez à forma geométrica, acarretando em um aumento significativo nas propriedades deste. Adicionalmente, o material apresenta uma microestrutura mais refinada e possivelmente livre de defeitos como porosidades e precipitados (McQueen *et al* 1995).

De modo a obter uma visão mais aprofundada do processo é necessário conhecer as propriedades influentes no processo, dentre as quais:

- A matéria-prima: caracteriza-se pela composição química, microestrutura e propriedades mecânicas. Isto possui influência direta na temperaturas de realização do processo de conformação.
- Equipamento: o equipamento possui influência nas condições sobre o qual será realizada o trabalho do material, como velocidade de deformação, capacidade de forjamento, além do modo operacional.
- Matriz de forjamento: a matriz de forjamento possui como característica a adequação ou não ao trabalho destinado e a correta realização do processo. A matriz de forjamento deve suportar os esforços impostos durante o processo, principalmente as tensões de forjamento e ciclo térmico processo.

Com o devido conhecimento destas características é possível estabelecer o modo como o forjamento deve ser realizado. Para isso, comumente são utilizados cálculos baseados em conceitos básicos do processo, assim como *softwares* de simulação por elementos finitos. A simulação por elementos finitos aplicados especificamente em processos de deformação plástica surgiu em meados dos anos 1960 e 1970 (Marques *et al*, 2012). Para processos de forjamento, a utilização da simulação numérica iniciou-se com maior valor de detalhe somente a partir do final do século 20.

Como quesito primordial para obter valores simulacionais coerentes ao resultado final, é de extrema importância utilizar parâmetros de entrada fiéis as propriedades físicas e mecânicas. Também se deve considerar condições de contorno (temperatura da geratriz, atrito interfacial, Temperatura do ambiente, material, etc.) , mais próximas possíveis da realidade do processo.

Segundo (Rodrigues, et al., 2005), a temperatura de operação das matrizes é definida em função da lote de produção. Uma taxa de produção elevada ocasiona em menor tempo para arrefecimento das matrizes e como consequência temperaturas de funcionamento mais elevadas. Altan, et al, (2005) aponta também que em temperaturas elevadas os danos por erosão e desgaste das matrizes serão mais acentuados. Portanto, materiais com elevada dureza e resistência a quente devem ser utilizados para a fabricação das matrizes. Um controle adequado da temperatura de operação reflete diretamente sobre o tempo de vida das matrizes (Baoshan, et al., 2017).

Durante o ciclo de produção, as matrizes são expostas a diferentes gradientes térmicos. As matrizes são aquecidas pelo contato com a matéria-prima quente e refrigeradas pela adição dos fluidos lubrificantes. Através do monitoramento detalhado destes gradientes térmicos é possível indentificar possíveis ciclos regulares e irregulares de funcionamento das matrizes (Rodrigues, et al., 2005). Regimes de operação com alta oscilação térmica são propícios para que ocorra mecanismos de desgaste térmicos.

Além do impacto sofrido pelas matrizes de forjamento a estrutura da prensa de forjamento também sofre danos térmicos. Tais danos são mais frequentes nas guias da máquina devido as altas temperaturas (Zdenek, 2013).

2.2 AÇOS PARA MATRIZES DE FORJAMENTO A QUENTE

Os materiais para utilização em matrizes de forjamento normalmente pertencem à série AISI H. Em menor escala, também são empregados os aços ligados AISI 4300 e 4100. Os aços para ferramenta devem possuir excelente susceptibilidade ao tratamento térmico, além de elevada resistência mecânica e ao desgaste.

A escolha correta do material, procurando evitar a ocorrência de danos por desgaste, possui efeito direto no tempo de vida das matrizes. Isto contribui para a redução de custos dos materiais forjados (Mueller, et al., 2016).

Apesar de serem bastante conhecidos, os aços ferramenta não são definidos como aços comuns ao carbono ou baixa liga (Mesquita, et al., 2009). A definição proposta pela *Iron and Steel Society* é que aços ferramenta são aços ao carbono, em liga ou aços rápidos capazes de serem temperados e revenidos (Metals Handbook, 1989). Os aços ferramenta são empregados em aplicações que requerem elevada resistência mecânica, resistência ao desgaste e alta tenacidade. Os aços ferramentas utilizadas nas matrizes de forjamento a quente devem necessariamente possuir propriedades como resistência a quente, resistência ao revenido (ou a perda em dureza), tenacidade, temperabilidade, usinabilidade e resposta à nitretação (Metals Handbook, 1990).

As matrizes de forjamento são expostas a severa ciclagem térmica e carregamento mecânico, o que requer ótimas propriedades do material da ferramenta. Assim, existem fenômenos que reduzem a vida útil da ferramenta, sendo os principais o desgaste, a deformação plástica, fadiga mecânica e fadiga térmica.

Fatores na seleção de materiais para matrizes de forjamento a quente:

As propriedades necessárias para que o material seja utilizado na fabricação de matrizes dependem do tipo de processo e características geométricas da peça a ser fabricada. Entretanto, há uma série de propriedades gerais as quais são requisito para operações de forjamento (Dieter, 1986).

- **Resistência a quente:**

Os materiais metálicos apresentam um comportamento típico com o aumento da temperatura. Estes apresentam uma redução de sua resistência mecânica com o aumento da temperatura, isto devido à maior facilidade na movimentação de discordâncias. Devido às altas

temperaturas de trabalho no forjamento a quente, a resistência a quente será a propriedade mais solicitada destes aços.

O tempo de contato da matriz com a geratriz em altas temperaturas também contribui para a redução da resistência a quente. O tipo de equipamento utilizado também possui influência no tempo de contato, visto que prensas hidráulicas resultam em maiores tempos de contato entre matriz e geratriz, e forjamento com martelo de queda apresenta menores tempos de contato.

- **Dureza a quente:**

A elevada temperatura em conjunto com as enormes tensões impostas sobre as matrizes de forjamento resulta em diferentes mecanismos de desgaste nas matrizes. O desgaste abrasivo é um dos tipos de desgaste que mais implicam em danos a matriz, reduzindo seu tempo de vida. Uma elevada dureza superficial aumenta a resistência ao desgaste abrasivo. No forjamento a quente é aconselhável utilizar materiais com uma boa dureza a quente, reduzindo os danos impostos pelos carregamentos termomecânicos sobre as matrizes. A Figura 7 apresenta o efeito da temperatura na dureza de diferentes tipos de aço ferramenta para trabalho a quente.

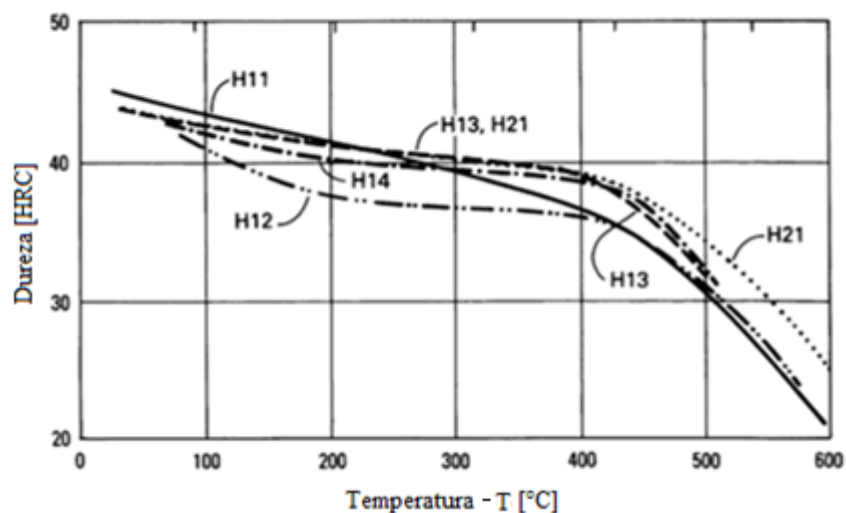


Figura 7. Dureza a quente dos aços AISI ferramenta para trabalho a quente, mantidos a 30 min. nas temperaturas. Adaptado de (Metals Handbook, 1989)

- **Susceptibilidade ao tratamento térmico:**

Aços ferramenta devem possuir alta susceptibilidade ao tratamento térmico, visto que diversas propriedades são alcançadas devido ao tratamento térmico, como, por exemplo, a resistência ao desgaste e aumento da dureza. Também é desejável que os aços para matrizes de forjamento possuam a capacidade de serem endurecidos uniformemente. Esta capacidade é dependente da composição do material e, portanto, geralmente os aços ferramenta possuem elevada quantidade de elementos microligantes como Mg, Si, Cr, e W (Wang, et al., 2006). A microestrutura final dos aços após o tratamento térmico também é um fator importante (Miller, 2009). Busca-se um tratamento que possibilite que o material possua carbeto duros, os quais contribuem para uma redução de desgaste (Mueller, et al., 2016). Como consequência, ocorre à redução da tenacidade do material (Callister, 2002). A Figura 8 apresenta os ciclos de tratamento térmico para um aço ferramenta.

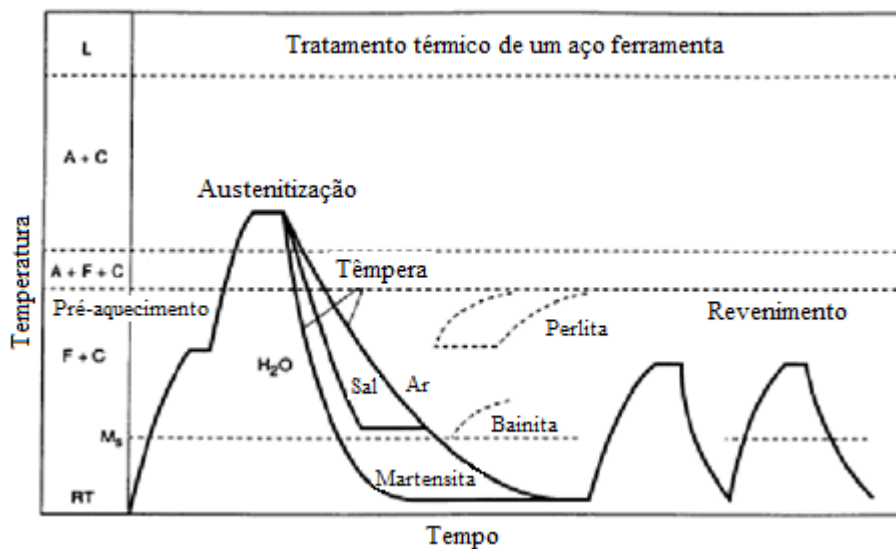


Figura 8. Tratamento térmico de aços ferramenta para trabalho a quente. Adaptado de (Deshpande, et al., 2011)

- **Resistência ao desgaste**

O desgaste é uma mudança gradual nas dimensões de matrizes, causada por corrosão, adesão e abrasão pelo transporte ou descolamento de partículas duras (Metals Handbook, 1989). Segundo (Altan, et al., 2005), o desgaste por abrasão é o principal mecanismo de desgaste em operações de forjamento, seguido pelo mecanismo de desgaste por adesão. Dahl (1999) afirma que, somados, estes são os mais importantes mecanismos de desgaste em matrizes de forjamento.

Uma elevada resistência e dureza a quente na superfície das materizes proporcionam maiores índices de resistência a abrasão (Deshpande, et al., 2011). Aços capazes de manter suas propriedades em altas temperaturas garantem menores níveis de desgaste. A Figura 7 compara a dureza a quente de diversos materiais para aplicações em matrizes de forjamento a quente.

- **Resistencia a deformação plastica**

O limite de elasticidade de um aço está diretamente relacionado com o aumento da temperatura, conforme demonstrado na Figura 9. Uma alta dureza inicial garante uma boa resistência a ruptura a alta temperatura. A resistência a ruptura depende do tratamento térmico, da composição e dureza do aço (Altan, et al., 2005). Uma prática normal é determinar a dureza de um aço em função da tenacidade requerida, visto que uma alta dureza ocasiona uma menor tenacidade, (Metals Handbook, 1989), conforme apresentado anteriormente na Figura 5

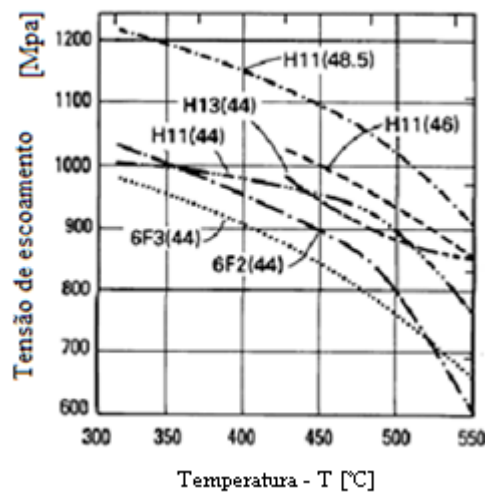


Figura 9. Resistência de um aço a deformação plástica a elevada temperatura, valores em parênteses indicam a dureza “Rockwell C” na temperatura ambiente. Adaptado de (Metals Handbook, 1989)

- **Tenacidade**

A maioria das falhas pode ser compreendida baseada em propriedades relacionadas à resistência a quente do aço ferramenta e à tenacidade do aço ferramenta (Mesquita, et al., 2009). A tenacidade a fratura de um material pode ser medida através do ensaio de impacto “Charpy”, conforme Figura 10. A tenacidade de um aço é reduzida de acordo com a adição de elementos de liga, (Metals Handbook, 1990). Aços de ligas médias, como H11, H12 e H13, têm melhor

resistência a fratura frágil em comparação com H14, H19 e H21, que possuem maior teor de liga (Metals Handbook, 1989). Ao aumentar a dureza de um aço, em contrapartida, sua resistência ao impacto é reduzida (Altan, et al., 2005). Por outro lado, a resistência ao desgaste e a resistência a quente diminuem com a redução da dureza.

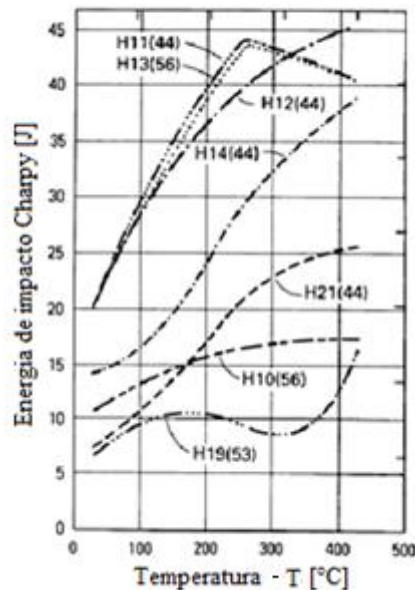


Figura 10. Resistência de um aço a deformação plástica a elevada temperatura, valores em parênteses indicam a dureza “Rockwell C” na temperatura ambiente. Adaptado de (Metals Handbook, 1989)

- **Resistência a trincas térmicas**

A expansão não uniforme, causada por gradientes térmicos da superfície até o centro da matriz é o principal fator que contribui para a ocorrência de trincas de origem térmica, (Metals Handbook, 1989). Um material com alta condutividade térmica tornará as matrizes menos propensas à ocorrência de trincas, conduzindo o calor rapidamente para longe da superfície da matriz (Altan, et al., 2005). A magnitude das tensões térmicas causadas pela expansão não uniforme ou gradientes de temperatura também dependem do coeficiente de expansão térmica do aço; onde quanto maior o coeficiente de expansão térmica, maiores as tensões (Metals Handbook, 1989).

- **Resistência a fadiga mecânica**

A fadiga mecânica das matrizes de forjamento é afetada pela magnitude das cargas aplicadas, a temperatura média da matriz e a condição da superfície da matriz (Metals Handbook, 1989). As fissuras por fadiga geralmente iniciam em pontos nos quais as tensões são mais altas. Como exemplo destes pontos citam-se as cavidades com raios de curvatura acentuados cujos efeitos no processo de fadiga são semelhantes aos entalhes (Altan, et al., 2005).

2.2.1 Falhas Em Matrizes de Forjamento.

Peças com geometria complexas e de precisão são produzidas quase que exclusivamente através do processo de forjamento em matrizes fechadas (Dahl, et al., 1999). Portanto, as matrizes devem resistir a pressões de contato elevadas acima da tensão de escoamento do material.

A origem das falhas em matrizes foi o motivo de diversos estudos que procuram determinar suas causas. Estas causas foram amplamente divididas em três grupos distintos, conforme Figura 11, e podem ser compreendidas como as falhas com origem catastrófica, falhas com origem de fabricação e as falhas com origem operacional. As falhas com origem catastrófica normalmente ocorrem devido a erros de projeto, arranjo operacional, armazenamento e manuseio inadequado. As falhas com origem na fabricação ocorrem pela não-conformidade entre o material e o processo de fabricação designado, assim como erros ocasionados por tratamento térmico inadequado. As falhas com origem operacional, são afetadas pelas condições de operação como temperatura de aquecimento e carregamento mecânico, como também em virtude do desconhecimento do operador (Chander, et al., 2016).



Figura 11. Classificação das causas de falhas em matrizes. Adaptado de (Chander, et al., 2016)

A qualidade das matrizes de forjamento possui influência direta na qualidade e acabamento das peças produzidas. Também, salienta-se que o custo do ferramental representa entre 5 e 30% do custo de produção (Magri, et al., 2013). A maioria dos casos de falhas em matrizes, aproximadamente 70%, estão relacionados com o desgaste (Lange, *et al* 1992).

O desgaste de matrizes de forjamento é comumente dividido em desgaste adesivo, abrasivo, oxidação ou outras reações químicas, e fadiga térmica (Cetlin, 2014). O desgaste por abrasão representa o maior impacto na vidas das matrizes (Summerville, et al., 1995). No processo de forjamento a vida das ferramentas é influenciada por diversos tipos de danos, conforme sumarizado na Figura 12 (Lange, *et al* 1992).

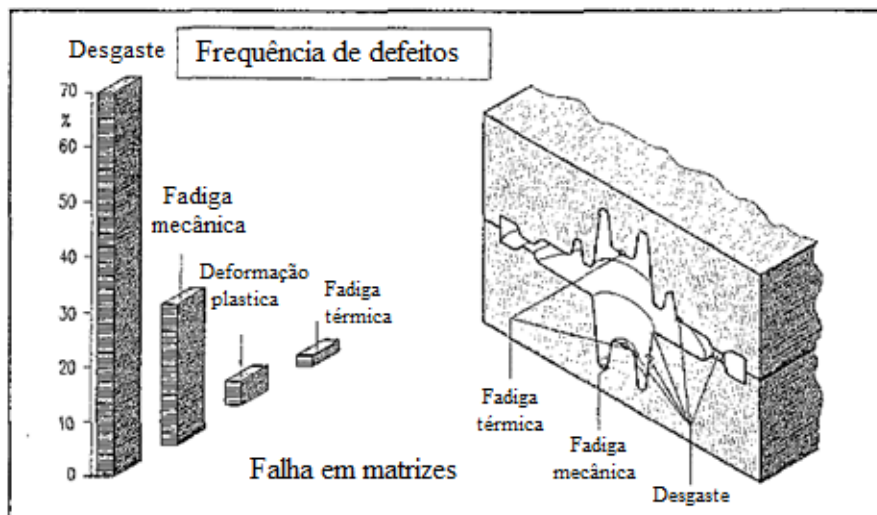


Figura 12. Mecanismos de falha em matrizes de forjamento. Adaptado de (Lange, *et al* 1992)

Mecanismos De Desgaste De Origem Térmica

Em operações de forjamento a quente, a superfície da matriz está sujeita a mudanças severas de temperatura (Tanaka, et al., 2005). Essas mudanças devem-se principalmente ao contato com a geratriz em altas temperaturas e as práticas de refrigeração e lubrificação.

Na Figura 13 é exemplificado um ciclo térmico do processo de forjamento a quente em uma prensa mecânica. O ciclo completo de forjamento foi simulado iniciando com a matriz a uma temperatura de pré-aquecimento uniforme (T_0), conforme apresentado na Figura 13. Durante período de permanência da matriz (T_0-t_1), a geratriz aquecida é posta em contato sobre a matriz inferior. Após o forjamento (t_1-t_2), o forjado permanece na cavidade da matriz inferior durante o período de “permanência” (t_2-t_3). Depois que o forjado é removido, e ambas matrizes superior e inferior são pulverizadas com o lubrificante durante o período de “resfriamento” (t_3-t_4). A temperatura da superfície da matriz decai rapidamente durante a pulverização de lubrificante, mas aumenta novamente no tempo de permanência durante a transferência da peça da estação para a matriz novamente.

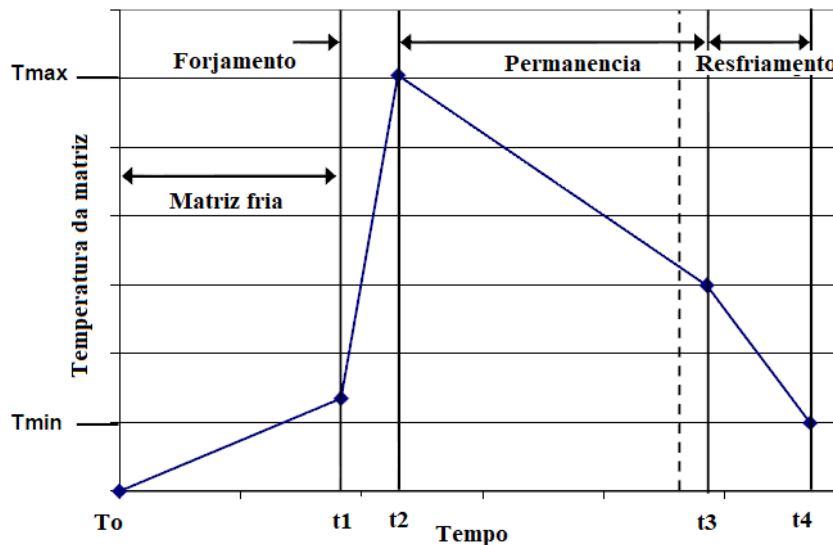


Figura 13. Ciclo térmico em uma matriz de forjamento a quente em uma prensa mecânica. Adaptado de (Altan & Shirgaokar, 2007)

Durante a sua vida útil, as matrizes de forjamento a quente são submetidas a aquecimentos e resfriamentos cíclicos (Figura 13). Devido a isto, ocorrem tensões térmicas, as quais favorecem a formação de fissuras na superfície das matrizes (Behrens, et al., 2005).

O carregamento térmico pelo contato das matrizes com o material quente durante a deformação é frequentemente a razão de falhas em matrizes de forjamento (Lange, et al., 1992). O resultado deste carregamento sobre as matrizes é a perda de dureza superficial (Behrens, et al., 2005) (Tanaka, et al., 2005) e, conseqüentemente, o desgaste por abrasão (Gronostajski, *et al* 2016). Além de contribuírem para o desgaste abrasivo, os ciclos de resfriamento e aquecimento geram tensões internas nas matrizes, que resultam em trincas superficiais (Magalhães F., *et al* 2014).

A fadiga térmica, um resultado deste gradiente de temperaturas, é compreendida como a deterioração gradual dos materiais que sofrem aquecimentos e resfriamentos alternados durante os quais a livre expansão térmica é parcial ou completamente restringida (Magalhães F., *et al* 2014).

Diversos pesquisadores buscaram analisar os efeitos do ciclo térmico na vida das matrizes de forjamento realizando análises numéricas da ocorrência de trincas térmicas superficiais. Como exemplos, pode-se citar os estudos de Cetlin (2014), Hawryluk (2016), Chander (2016) e Dworzak *et al*, (2017).

A deformação plástica também é influenciada pelas altas tensões e temperatura impostas sobre a matriz (Abachi, 2004). Quando as tensões ultrapassam o limite de escoamento do material da matriz ocorre a deformação nos locais mais solicitados, como cantos vivos e protuberâncias delgadas (Flausino, 2010).

As regiões de deformação plástica em matrizes de forjamento normalmente são originadas pela perda de dureza superficial (Behrens, et al., 2005). Estes casos estão associados à ocorrência de mudanças de fases em decorrência de temperaturas elevadas na superfície da matriz (Wei, *et al* 2011), (Cancelos, *et al* 2015). É possível também que ocorra revenimento superficial, que induz a perda de dureza e conseqüentemente a deformação plástica na superfície da matriz de forjamento (Flausino, 2010).

Devido à exposição das matrizes de forjamento a inúmeros mecanismos é inevitável a busca por medidas que garantam uma maior resistência ao desgaste. Uma das maneiras de aumentar o tempo de vida das matrizes é a aplicação de tratamentos superficiais. A deposição de filmes na superfície das matrizes garante maior nível de resistência, contribuindo para a redução dos danos na matriz.

Tratamentos Superficiais Em Matrizes De Forjamento

Em matrizes de forjamento a quente normalmente são depositadas camadas protetivas que contribuem para a redução ou mitigação dos eventuais danos que possam ocorrer. O aumento na dureza superficial permite retardar diversos mecanismos de falha nas matrizes, como a fadiga térmica e o desgaste abrasivo. Entre os tratamentos superficiais aplicados em matrizes de forjamento, o processo de nitretação é um dos com maior difusão.

A nitretação é um processo termoquímico de enriquecimento da superfície com N_2 . Esta técnica forma uma camada de nitretos e nitrogênio dissolvido na matriz ferrítica (Santaella, 2009). Dependendo do processo, pode ocorrer uma camada de nitretos, normalmente de coloração branca e muito dura. Esta camada pode ser apropriada para a aplicação em peças, porém para a proteção de matrizes esta camada é danosa devido à enorme fragilidade atribuída à superfície da matriz. Em matrizes de forjamento a camada de difusão deve possuir uma transição entre a camada dura e o substrato. Na Figura 14 é apresentado o perfil de dureza Vickers na superfície de um aço ferramenta.

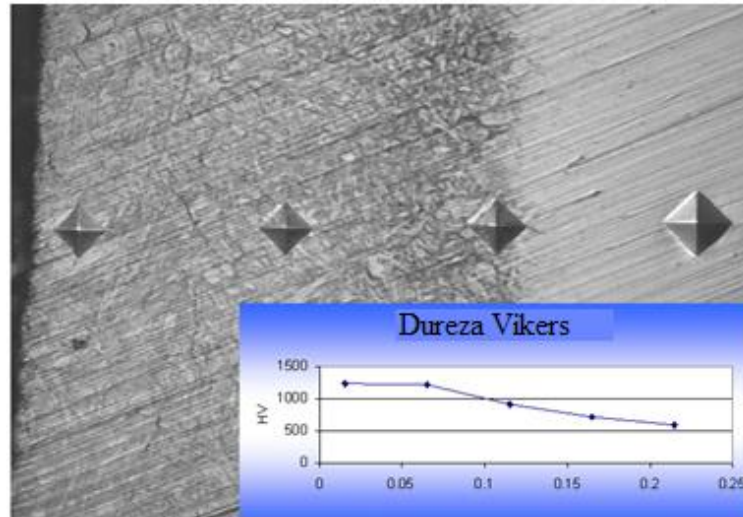


Figura 14. Camada nitretada em um aço ferramenta. (Santaella, 2009)

Diversos estudos relacionados aos métodos de tratamento de superfície levaram ao desenvolvimento de tecnologias híbridas, consistindo na aplicação de duas ou mais técnicas de engenharia de superfície, conforme apresentado na Figura 15 (Altan, et al., 2007). Devido à combinação e interação entre várias técnicas é possível obter propriedades da camada superficial que são inatingíveis quando estas técnicas são usadas isoladamente (Hawryluk, 2016). Tecnologias híbridas representam as mais recentes técnicas de modificação das propriedades de camadas superficiais. Com essas tecnologias é possível gerar uma barreira que influencia e reduz os mecanismos de desgaste em matrizes de forjamento.

A camada híbrida usada com maior frequência é a aplicação da camada PVD (*Physical Vapor Deposition*) ou CVD (*Chemical Vapor Deposition*). A camada PVD é uma excelente alternativa e possui resultados positivos comprovados para a vida útil das matrizes. Tal camada produz uma superfície com excelentes características tribológicas, principalmente relacionadas ao baixo atrito e aumento da resistência ao desgaste abrasivo (Santaella, 2009).

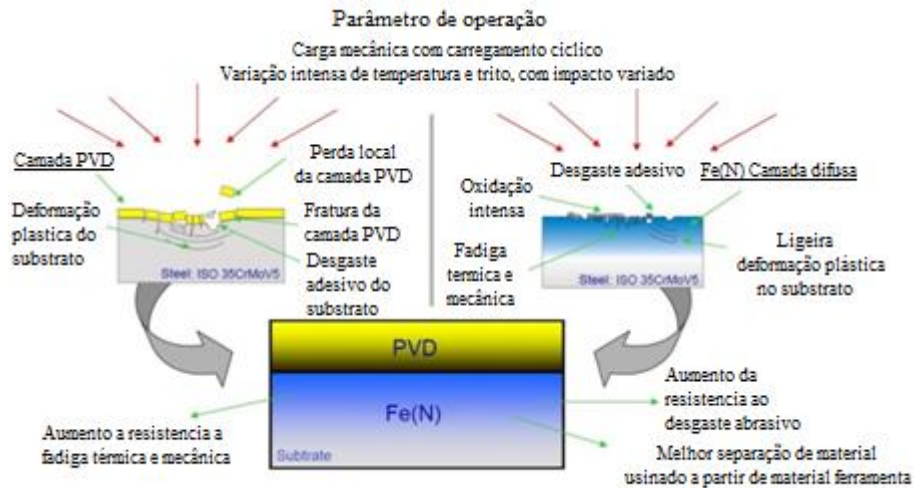


Figura 15. Funções particulares da camada superficial PVD. Adaptado de (Altan, et al., 2007)

Diversas pesquisas apontam para a aplicação de camadas protetivas sobre a superfície de matrizes de forjamento através da aplicação de elementos cerâmicos como o SiAlON (nitreto de alumínio e silício), (Altan, et al., 2007), (Deshpande, et al., 2011). Isto atribui à matriz de forjamento elevada dureza superficial e resistência ao desgaste. Estudos realizados pelo *Institute of Metal Forming & Machine Tools (IFUM)* da Universidade de Hannover, e pela Universidade de Erlangen-Nuremberg, buscaram verificar a aplicabilidade de deposições de elementos cerâmicos em matrizes de forjamento e seu efeito sobre o desgaste. A Figura 16 apresenta uma comparação entre os valores de dureza superficial de um aço com uma camada cerâmica depositada de SiAlON e de materiais similares.

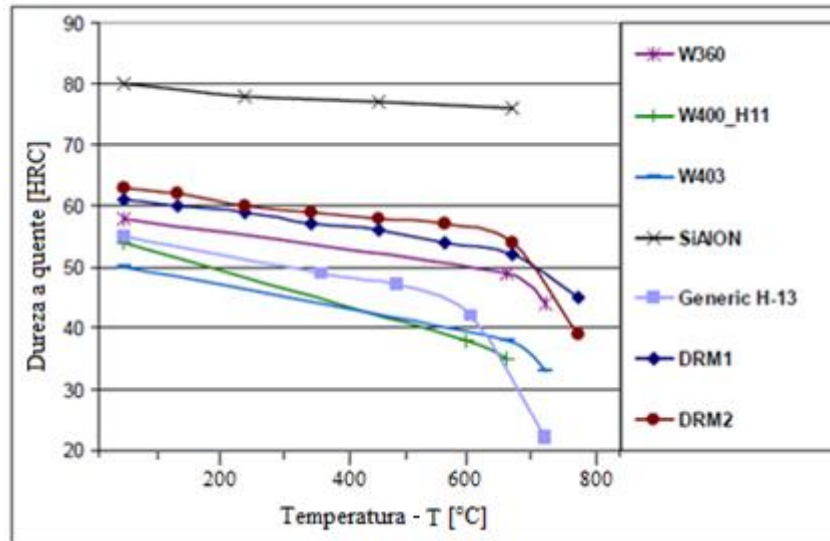


Figura 16. Análise da dureza a quente com a aplicação superficial SiAlON em um aço ferramenta H13 comparando com materiais similares. Adaptado de (Altan, et al., 2007)

Um novo método de proteção das matrizes, proposto primeiramente em Rosentock (2015), baseia-se no uso de uma proteção física e removível denominada máscara metálica para a proteção da cavidade das matrizes de forjamento. A máscara fica deposita sobre a geometria da cavidade da matriz. Uma ilustração do conceito de máscaras metálicas de proteção pode ser observada conforme Figura 17.

Máscaras metálicas:

A máscara metálica protege a matriz e é inserida entre a matriz e a peça de trabalho, conforme previamente descrito na seção 2.2.1. Uma vez que o conceito das máscaras metálicas somente é viável se apresentar boa durabilidade, o material das máscaras deve ser capaz de suportar o maior número possível de ciclos de forjamento sem que ocorra falha. Outros critérios para os materiais das máscaras metálicas são a boa formabilidade do material, a fim de possibilitar a conformação da máscara segundo a cavidade da matriz e os baixos custos de material. Além disso, o material da chapa deve ter boas propriedades mecânicas, como alta resistência ao calor, resistência à abrasão e boa resistência ao choque térmico (Haußmann, 2015).

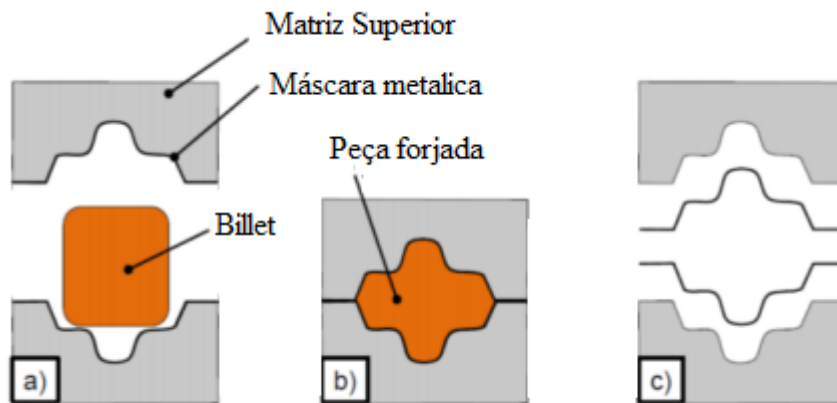


Figura 17. Conceito da aplicação de máscaras; a) posicionamento da geratriz e configuração, b) forjamento sobre a máscara e c) remoção de máscaras das matrizes. Adaptado de (Rosenstock, 2015)

Trabalhos anteriores apontam que o uso de máscaras metálicas no forjamento também reduz a temperatura na superfície das matrizes e amplitude térmica em ciclos de forjamento, conforme Figura 18 (Haußmann, 2015) e (Dworzak, et al., 2017).

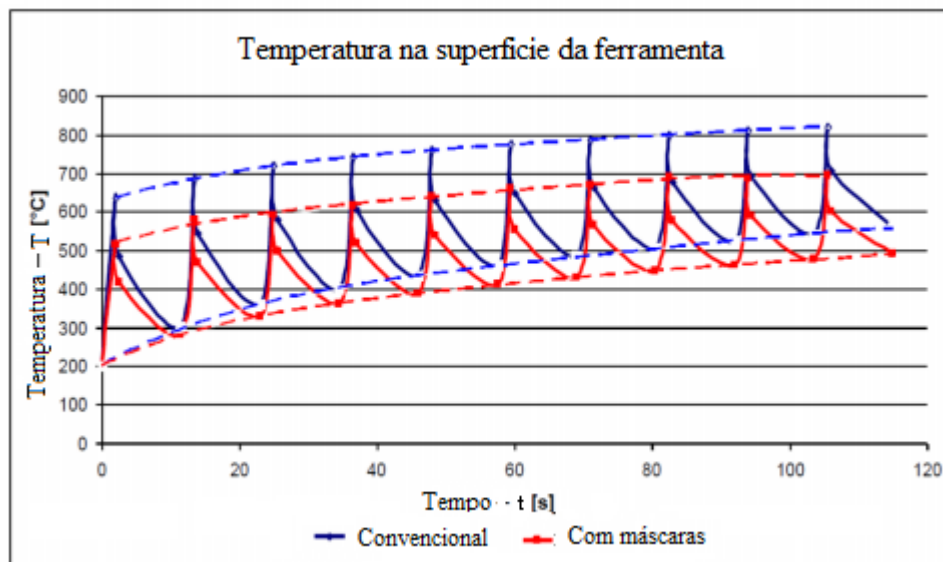


Figura 18. Redução da amplitude térmica e do pico de temperatura na superfície durante 10 ciclos de forjamento. Adaptado de (Haußmann, 2015)

2.3 TEMPERATURA E TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO FORJAMENTO

No processo de forjamento a quente, simultaneamente a conformação do material, ocorre uma série de eventos de troca de calor. Estes eventos contribuem e afetam diretamente

a qualidade da peça e suas características mecânicas e metalúrgicas. Os mecanismos responsáveis pelas trocas térmicas são apresentados de maneira esquemática na Figura 19.

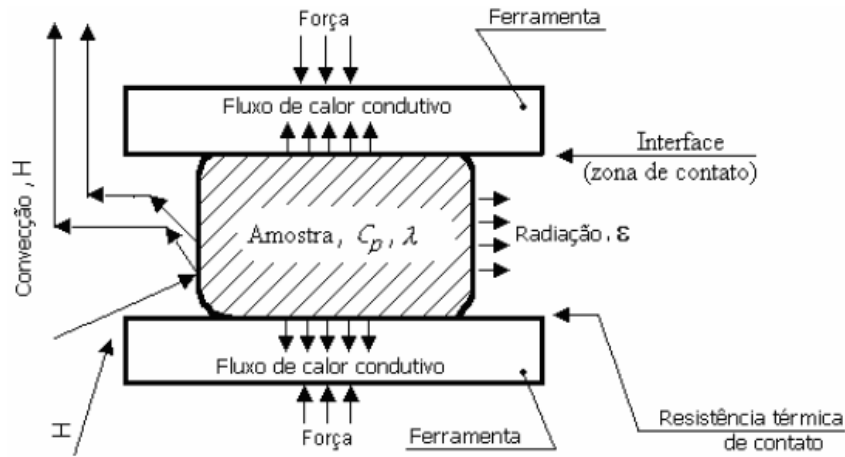


Figura 19. Representação esquemática do estado térmico de um corpo sendo forjado. (Polozine, 2009)

Como o objetivo do trabalho a quente é realizar grandes deformação nos materiais com um menor esforço, é necessário aquecer a matéria-prima para aumentar sua plasticidade. Entretanto, é típico a formação de uma camada oxidada na superfície do material, exceto em processos que ocorram em atmosferas protetoras. A temperatura de forjamento além de possuir como característica a redução na tensão de escoamento do material, influi diretamente no estado térmico do processo, como por exemplo, no coeficiente de transferência condutiva através da zona de contato (α). Este coeficiente é dependente da interface de contato e das propriedades térmicas dos materiais utilizados.

Um conhecimento mais abrangente dos mecanismos de transferência de calor entre a matriz de forjamento e o material forjado deve ser considerado para uma melhor compreensão das reações de troca térmica. É indispensável estabelecer análises térmicas do processo em questão, afim de obter maior conhecimento do carregamento térmico os quais as matrizes de forjamento estão submetidos.

2.3.1 Geração e Transferência de Calor

Segundo Dieter(1986) aproximadamente 95% do trabalho mecânico de deformação é convertido em calor. Uma parte deste calor é perdido por condução através das ferramentas ou

perdido para o ambiente. Entretanto, uma parcela desta energia é mantida, aumentando a temperatura do componente forjado.

Para para um processo simples, desconsiderando atrito, o aumento máximo teórico da temperatura é dado pela seguinte equação.

$$\Delta T = \frac{U_p}{\rho \cdot C_p \cdot F_C} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde

U_p = trabalho de deformação plástica por unidade de volume [j/mm³];

ρ = densidade do material [kg/m³];

C_p = calor específico do material [j/kg*K];

F_C = fator de conversão de energia mecânica em energia térmica, 778 [pés-lb/Btu].

Nos processos de forjamento, tanto a deformação plástica como o atrito contribuem para a geração de calor no processo. Têm-se que aproximadamente 90% da energia envolvida no processo é transformada em calor (Farren et al. 1925), (Altan, Ngaile, & Shen, 2005).

Em operações de forjamento contínuo, o aumento de temperatura pode atingir centenas de graus. Este aumento influencia as condições de lubrificação, a vida da ferramenta e a microestrutura e propriedades da peça forjada (Altan, et al., 2005). Atualmente, com o uso das simulações em elementos finitos dos processos, é possível prever os carregamentos térmicos os quais as matrizes e o material a ser forjado estarão sujeitos. Este conhecimento possibilita definir valores das propriedades térmicas, como por exemplo, o tempo de contato e o coeficiente de transferência térmica interfacial (IHTC, ou simplesmente HTC) entre matriz/geratriz.

No processo de forjamento a magnitude e distribuição da temperatura depende de fatores como:

- As temperaturas iniciais da matriz e geratriz;
- A geração de calor pela deformação e atrito na interface matriz/geratriz;
- A transferência de calor entre o material forjado com o ambiente, e do ambiente com a matriz de forjamento, podendo ser também com o lubrificante e o meio.

No processo de forjamento, o estado térmico do processo pode ser determinado pela temperatura instantânea das matrizes, geratriz e o ambiente. A temperatura instantânea pode ser determinada conforme a Eq. 2 (Altan, et al., 2005).

$$T_A = T_w + \vartheta_D + \vartheta_F - \vartheta_T - \vartheta_R - \vartheta_C \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

T_A = temperatura instantânea das matrizes [°C];

T_w = temperatura inicial do material a ser forjado [°C];

ϑ_D = aumento de temperatura devido à deformação plástica [°C];

ϑ_F = aumento de temperatura devido ao atrito interfacial [°C];

ϑ_T = queda de temperatura entre a interface matriz/geratriz [°C];

ϑ_R = queda de temperatura pela radiação com o meio [°C];

ϑ_C = queda de temperatura convectiva entre o meio [°C].

O aumento de temperatura pela deformação em um intervalo de tempo é descrito pela Eq. 2.1 :

$$\vartheta_D = \frac{k_f \cdot \varphi}{C_M \cdot \rho} \beta \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Onde:

k_f = tensão de escoamento do material a ser forjado [Mpa];

φ = deformação verdadeira [-];

C_p = calor específico do material [j/kg*K];

ρ = densidade do material [kg/m³];

β = fração de energia transfada em calor respeitando a seguinte situação $0 \leq \beta \leq 1$, sendo usualmente utilizado o valor de 0,9. (Baoshan, et al., 2017)

O aumento de temperatura devido ao atrito interfacial entre matriz e geratriz pode ser determinado pela Eq. 2.2.

$$\vartheta_F = \frac{F_C \cdot f \cdot k_f \cdot v \cdot F \cdot \Delta F}{C_M \cdot V} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde:

v = velocidade interfacial entre matriz/geratriz [mm/s];

V = volume do material a ser forjado, este volume é o que estará sujeito ao aumento de temperatura [mm³];

F_C = fator de conversão de energia mecânica em energia térmica 778 [pés-lb/Btu].;

O parâmetro f representa o fator de atrito na interface matriz/geratriz, tal que a tensão de cisalhamento é expressa conforme Eq. 2.2.1.

$$\tau = f \cdot k_f \quad (\text{Eq. 2.2.1})$$

A parcela de calor perdido para o ambiente por radiação pode ser determinada através do modelo proposto por Stefan-Boltzman, conforme Eq. 2.3.

$$\vartheta_R = \sigma \cdot A_{rad} \cdot \varepsilon_T \cdot (T^4 - T_\infty^4) \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde:

ϑ_R = calor radiante líquido transferido de superfície por unidade de tempo [W];

σ = constante de Stefan-Boltzman, [$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$];

A_{rad} = área da superfície irradiante [m²];

T_∞ = Temperatura do ambiente [K].

Referente a determinação do coeficiente de emissividade total (ε_T), têm-se que esta é igual à proporção entre a emissão da superfície do corpo em questão em comparação à emissividade de um corpo perfeito, no caso um corpo negro. Através desta relação o coeficiente de emissividade total (ε_T), pode ser determinado pela Eq. 2.3.1:

$$\varepsilon_T = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{\int_0^\lambda \varepsilon_\lambda(\lambda, T) E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^\lambda E_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda} \quad (\text{Eq. 2.3.1})$$

Onde:

ε_T = coeficiente de emissividade total da superfície real na temperatura T [-];

T = temperatura da superfície examinada [K];

$E(T)$ = poder emissivo total da superfície real na temperatura T [W/m²];

$E_b(T)$ = poder emissivo total da superfície do corpo negro na temperatura T [W/m²];

λ = comprimento da onda emitida da superfície examinada [m];

$\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ = proporção de radiação emitida por superfícies iguais na mesma temperatura T , do corpo real e do corpo negro, em relação ao corpo negro, para o comprimento de onda λ ;

$E_{b\lambda}(\lambda, T)$ = poder emissivo monocromático da superfície do corpo negro na temperatura T , [W/m²];

A quantidade de calor perdido para o ambiente por convecção por unidade de tempo (ϑ_C) é expressa pela lei de Newton, Eq. 2.4:

$$\vartheta_C = h_{conv} \cdot A_{conv} \cdot (T - T_\infty) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Onde:

h_{conv} = coeficiente de transferência de calor por convecção [Wm⁻²*K];

A_{conv} = Área da superfície convectiva [m²];

T_∞ = Temperatura do ambiente [K]

A parcela de calor perdido por convecção e radiação, quando comparada com o valor de perda de temperatura por condução, é praticamente desprezível. Portanto, em aplicações industriais podem ser utilizados valores disponíveis em tabelas ou em bibliotecas de materiais disponíveis em softwares. Porém, em análises laboratoriais mais detalhadas são necessários valores mais precisos da emissividade total os quais devem ser medidos através de metodologias específicas. Polozine (2004) apresenta diversos métodos para obter valores da emissividade total de um componente.

A parcela da temperatura perdida na interface matriz /geratriz foi estudada por inúmeros autores, como por exemplo (Bardon, 1988), (Madhusudana, 2014), e é motivo de inúmeros estudos analíticos e experimentais. Sua determinação é de extrema importância para os processos de trabalho a quente visto que a perda de energia térmica por contato com a ferramenta possui a maior influência no processo. Esta perda pode influenciar, por exemplo, no carregamento térmico cíclico nas matrizes ou em mudanças microestruturais na matéria prima trabalhada.

2.3.2 Transferência de Calor Interfacial

Conforme previamente descrito, as temperaturas que se desenvolvem durante o processo de forjamento influenciam diretamente na lubrificação, na vida das ferramentas e na qualidade macroestrutural do produto forjado (Altan, et al., 2005).

O fenômeno de transferência de calor na interface de superfícies em contato é um fenômeno comum, conforme apresentado na Figura 20, e está presente em todos os processos realizados em alta ou baixa temperatura (Rywotycki, et al 2016). Entretanto, o mecanismo de transferência de calor é um fator complexo que envolve diferentes mecanismos de transferência de calor entre as interfaces de contato (Chang, et al., 2016), (Baoshan, et al 2017).

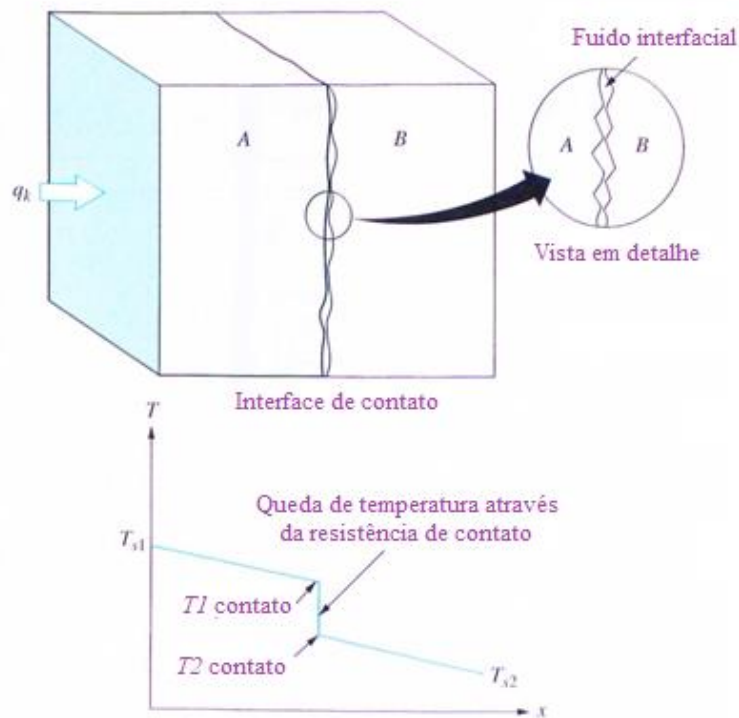


Figura 20. Transferência de calor entre interface entre sólidos. (Baskharone, 2012)

O coeficiente de transferência de calor interfacial descreve a capacidade de um corpo em contato perder calor através da sua interface. Geralmente, um valor alto do coeficiente de transferência de calor interfacial está relacionado a um alto estresse térmico resultando em uma redução no tempo de vida das ferramentas (Baoshan, et al 2017).

2.3.3 Mecanismo de Transferência de Calor em Superfícies em Contato

Irregularidades superficiais microscópicas estão presentes em praticamente todas as superfícies dos sólidos. A rugosidade superficial é a medida destas irregularidades, onde os erros microscópicos incluem desvios de planicidade, ondulação e em superfícies cilíndricas a circularidade (Madhusudana, 2014). Estas irregularidades podem estar relacionadas desde ao método de fabricação como a aspectos operacionais (Mantelli, et al., 2002). Devido às irregularidades geométricas, o contato de dois corpos sólidos é realizado por pontos discretos, conforme ilustrado na Figura 21.

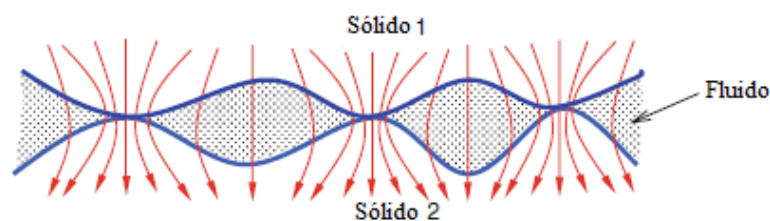


Figura 21. Vista esquemática da transferência de calor entre dois corpos em contato. Adaptado de (Madhusudana, 2014)

Devido a isso, deve ser considerado que a transferência de calor na região em contato ocorre de três modos distintos:

- Condução entre os pontos em contatos;
- Condução através do meio intersticial, como o ar;
- Radiação.

O espaço interfacial é geralmente muito pequeno para que ocorram correntes convectivas. Normalmente a radiação pode ser negligenciada a não ser que as temperaturas na região de contato forem superiores a 300°C e a temperatura não apresente uma queda expressiva. Portanto, a transferência de calor entre as zonas em contato depende, principalmente, da resistência de contato. Há também ocasiões em que pode ser considerada apenas a condução de calor entre os pontos de contato. No entanto, a área disponível para o fluxo de calor através das lacunas intersticiais é frequentemente maior que a área de contato real. Assim, o fluxo de calor através das lacunas não poder ser negligenciado, especialmente em casos em que os materiais não possuem boas características de condução de calor.

A condutância térmica de contato pode ser definida como a razão entre o fluxo de calor e a queda de temperatura em uma junta imperfeita, conforme apresentado na Figura 22 e descrito pela Eq.4.

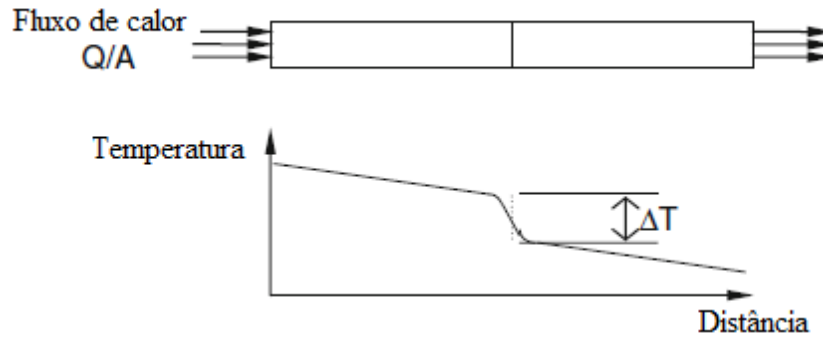


Figura 22. Queda de temperatura na interface de sólidos em contato. (Mantelli, et al., 2002)

$$h_c = \frac{Q/A}{\Delta T} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

Q = fluxo total de calor [W/m*K];

A = área nominal de contato [m²];

h_c = condutância térmica de contato [W/m²*K];

ΔT = diferença entre as temperaturas nas superfícies [K].

A resistência térmica de contato (RTC) é recíproca a condutância térmica de contato e pode ser determinada conforme Eq.5.

$$RTC = \frac{A \cdot \Delta T}{Q} \quad (\text{Eq. 5})$$

Se for possível separar o fluxo de calor através dos pontos de contato entre sólidos e o fluxo de calor através do meio intersticial ou gás, o fluxo de calor pode ser dividido entre os sólidos em contato e o gás resultando conforme Eq. 5.1.

$$Q = Q_s + Q_g \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Em que a condutância entre o ponto sólido é definida conforme Eq. 5.2.

$$h_s = \frac{Q_s/A}{\Delta T} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

E a condutância do gás é determinada pela Eq.6.

$$h_g = \frac{Q_g/A}{\Delta T} \quad (\text{Eq. 6})$$

Resultando na Eq. 7.

$$h_c = h_s + h_g \quad (\text{Eq. 7})$$

O fluxo de calor através dos pontos sólidos Q_s geralmente é determinado pela condução em testes de transferência de calor no vácuo. O fluxo de calor entre as lacunas Q_g é então determinado pela realização de testes no ambiente desejado e posterior comparação com os resultados entre o teste no vácuo e no ambiente. Contudo, é julgado que os valores das condutâncias não são independentes.

A condutância de pontos sólidos, tal como obtida no teste de vácuo, será menor que o obtido em um ambiente condutor. Isto ocorre pois o calor nas linhas de fluxo segue um caminho menos tortuoso no segundo teste. O efeito, no entanto, é pequeno a menos que as condutâncias sejam de magnitude comparável.

Parâmetros Que Afetam A Resistência Térmica de Contato

Conforme foi dito anteriormente, a CTC ou HTC é recíproca a RTC, sendo esta caracterizada como a resistência encontrada para a transferência de calor entre corpos em contato, conforme apresentado na Figura 21. Diversos estudos, como por exemplo (Bai, et al., 2012), (Bardon, et al., 1971), (Clausing, 1966), abordaram a influência de diferentes parâmetros sobre a RTC. Dentre os parâmetros apontados:

- Pressão mecânica de contato;
- Fluido intersticial;
- Camada de óxidos nas superfícies;
- Temperatura da interface;
- Topografia da superfície;
- Direção do fluxo de calor.

Influência da pressão de contato:

A pressão de contato afeta diretamente o valor da RTC (Filho, et al., 2000). Estudos de Villanueva(1997) e Bardon(1971) mostram que o valor da RTC diminui com o aumento da pressão de contato.

Influência do fluido intersticial:

Entre as irregularidades superficiais de dois corpos em contato pode estar retido tanto um líquido um gás ou simplesmente o vácuo; em consequência, estas substâncias modificam o valor da resistência térmica de contato. Esta mudança depende da pressão neste fluido e de suas características termofísicas. Na Figura 23 são apresentados valores da RTC para diferentes materiais intersticiais.

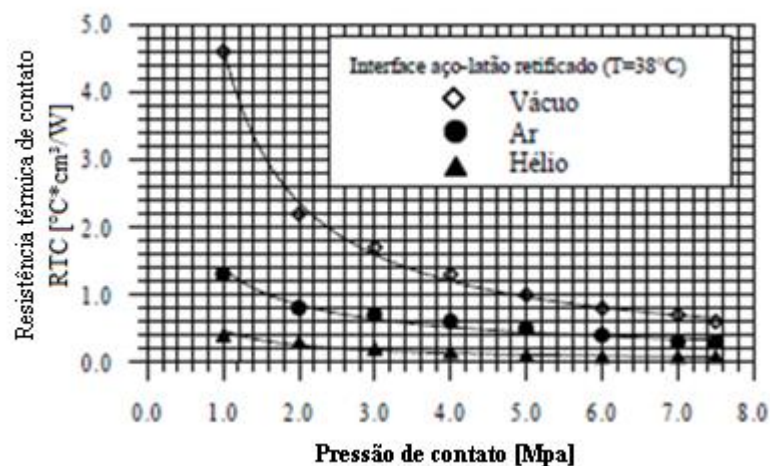


Figura 23. Variação da resistência de contato para diferentes fluidos. Adaptado de (Bardon, 1988)

Pressões elevadas aumentam a área de contato entre os sólidos, reduzindo a diferença da resistência térmica de contato entre diferentes fluidos. Porém, pressões baixas promovem que a transferência de calor entre as superfícies ocorra principalmente entre os fluidos.

Influência da camada oxidada superficial:

A presença de óxidos nas superfícies em contato contribui para um aumento no valor da RTC. Este comportamento ocorre, pois, a camada oxidada possui uma condutividade térmica inferior ao metal base (Filho, et al., 2000).

Influência da temperatura da interface:

Segundo Madhusudana(2014), quando a temperatura na interface das superfícies aumenta, o valor da RTC reduz. Isto ocorre devido à redução da dureza superficial, a qual resulta em maiores deformações e assim maiores áreas de contato entre as superfícies.

Influência da topografia da superfície:

Superfícies lisas apresentam maiores áreas de contato, reduzindo o valor da RTC; entretanto, salienta-se que nenhuma superfície é completamente lisa (Mantelli, et al., 2002). Segundo Laurent(1969), o aumento da pressão mecânica praticamente não afeta a rugosidade das superfícies, porém o valor da RTC é diretamente afetado.

Influência da direção do fluxo de calor:

Em alguns casos a RTC é uma função da direção do fluxo de calor através da interface. No entanto, ainda não há uma explicação satisfatória para este evento (Filho, et al., 2000).

2.4 MEDIDA DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR INTERFACIAL

Durante o trabalho a quente, o coeficiente de transferência de calor entre a geratriz e as matrizes possui um efeito importante na distribuição de temperatura, mudanças microestruturas e propriedades mecânicas das peças forjadas. O conhecimento deste parâmetro é de extrema importância, pois contribui para a transferência de calor e possui efeito direto no processo.

A medida de temperatura é uma necessidade para determinar o HTC. Os valores de temperatura são utilizados para determinar o fluxo de calor, dentre os métodos de medição destas temperaturas. A norma ASTM D 5470 determina regras a serem consideradas para as determinações deste parâmetro, atribuindo possíveis configurações de medição que devem ser tomadas. Contudo, uma variedade de novos métodos foi desenvolvida baseada nesta norma, as quais aqui serão tratadas.

Dentre as abordagens conhecidas para a determinação de temperaturas superficiais pode ser realizada através da:

- Medição direta da temperatura superficial;
- Medição indireta da temperatura superficial.

A vantagem dos métodos de determinação experimental da HTC baseados na medição direta de temperaturas superficiais é a possibilidade de executar a medição tanto no regime estacionário de transferência de calor quanto transitório (Polozine, 2009).

Os métodos baseados na medição indireta das temperaturas nas superfícies necessitam de uma abordagem mais trabalhosa e passível de erros. Dentre esta abordagem podem ser necessárias análises através de simulações numéricas e previsões matemáticas para determinar a real temperatura das superfícies.

Chang & Bramley, (2016) realizaram testes com o objetivo de determinar o coeficiente de transferência térmica através da medição direta das temperaturas na interface das matrizes de forjamento. Para a medição da temperatura superficial das matrizes foram utilizados termopares tipo “K”, dispostos na matriz de forjamento, para medir a temperatura no interior da matriz e um termopar tipo “J” localizado sobre a superfície da matriz para monitorar a temperatura superficial. Uma ilustração esquemática da configuração utilizada para estas medições é apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

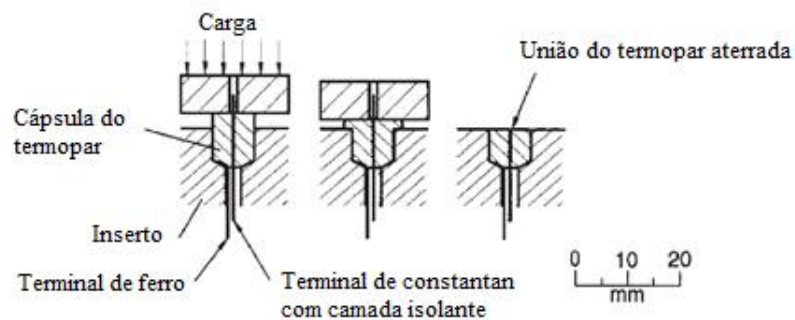


Figura 24. Montagem e fixação do termopar tipo J na superfície da matriz de forjamento. Adaptado de **(Chang, & Bramley, 2016)**

A calibração do termopar tipo “J” foi realizada em um forno através da curva de aquecimento. As temperaturas medidas e previstas foram usadas em uma análise inversa via software de elementos finitos. Relacionando valores medidos e simulados foi possível determinar o valor real do coeficiente de transferência de calor da interface.

Burte, (1990), Bai, (2012) e Chang, (2016) realizaram a medição das temperaturas e a determinação do coeficiente de transferência de calor através da medição indireta. Os autores utilizaram termopares dispostos na matriz de forjamento, e distanciados conforme ilustrado na Figura 25 e 26.

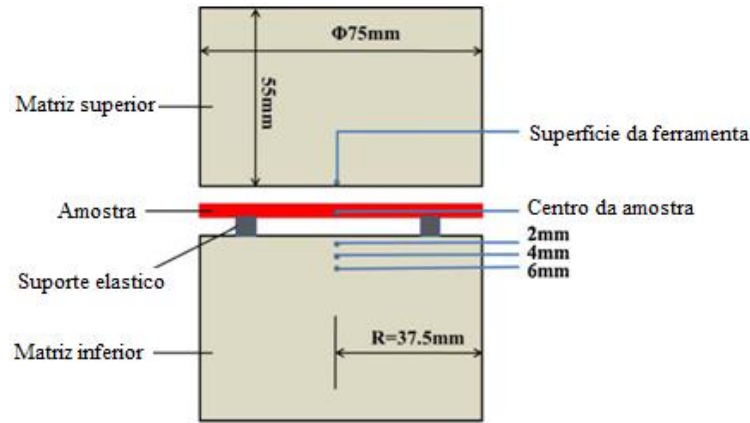


Figura 25. Dimensões do dispositivo de transferência de calor e as respectivas posições do termopar. Adaptado de (Chang Y. , *et al* 2016)

Os termopares utilizados foram fixados na matriz e submetidos a ciclos de forjamento na condição normal de utilização. Os valores medidos foram utilizados para estipular a temperatura na interface das matrizes através do modelamento do processo e da utilização do modelo de análise inversa criado. Os valores das medições experimentais foram comparados com valores simulados e utilizados na determinação do coeficiente de transferência térmica na interface da ferramenta.

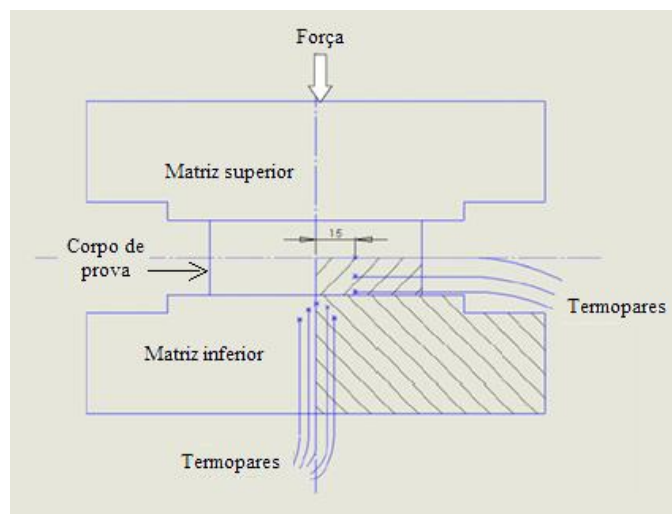


Figura 26. Configuração utilizada para a medição da temperatura. Adaptado de (Bai, *et al.*, 2012)

Diversos pesquisadores realizaram a medida de maneira semelhante à utilizada por Bai(2012) e determinaram as temperaturas nas superfícies através da extrapolação dos valores medidos, como Baoshan(2017) Rywotycki(2016) e Wang(2016).

Como descrito, o uso de medições locais de temperatura é uma prática comum e necessária na determinação do HTC. Sua combinação com a análise numérica inversa, através de softwares comerciais ou sub-rotinas, são de extrema importância ao processo. Esta metodologia reduz os possíveis erros decorrentes de uma possível determinação analítica da HTC. Ademais, este tipo de análise reduz o tempo de ajuste entre cálculos e valores de referência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia proposta para a realização deste trabalho se originou a partir de dois modelos experimentais Figura 27. Cada um destes modelos busca analisar a transferência de calor no processo de forjamento.

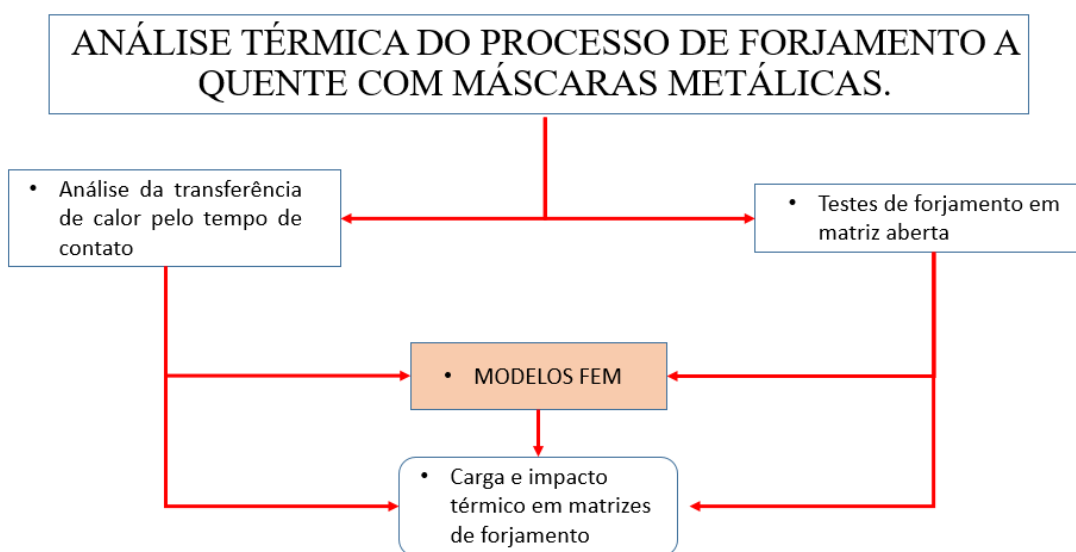


Figura 27. Fluxograma da metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELO TEMPO DE CONTATO

Com o objetivo de obter uma porção representativa da transferência de calor durante o processo de forjamento foi definida uma geometria simplificada a qual mantém a configuração próxima a um processo de forjamento normalmente realizado, conforme demonstrado na Figura 28.

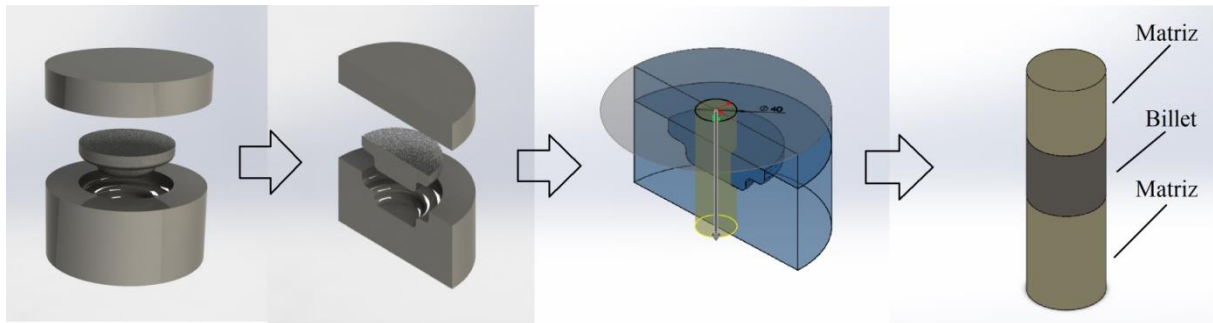


Figura 28. Geometria simplificada definida para os ensaios de transferência de calor pelo tempo de contato.

Por se tratar de um teste que busca verificar a transferência de calor no processo de forjamento, foi analisado apenas a transferência de calor quando a geratriz aquecida é posicionada sobre a matriz de forjamento. Assim, não foi considerada nesta dissertação a matriz superior, pois apenas a matriz inferior estará em contato com a geratriz aquecida.

Para a análise da transferência de calor relacionada ao tempo de contato, foram utilizadas medidas de temperatura em pontos distintos conforme configuração apresentada nas Figuras 29 e 30. Foram utilizadas matrizes de aço AISI H13 temperadas e nitretadas, apenas para verificar a influência dos tratamentos superficiais nas matrizes no perfil térmico dos experimentos.

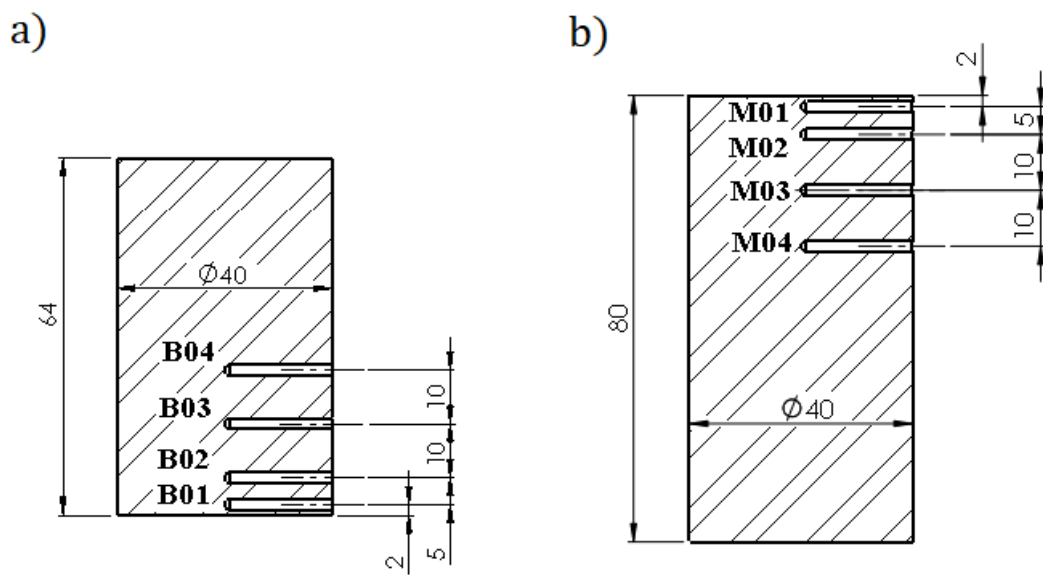


Figura 29. Geometria dos corpos de prova utilizados para a análise da transferência de calor pelo tempo de contato com os índices dos respectivos termopares, a) geratriz e b) matriz.

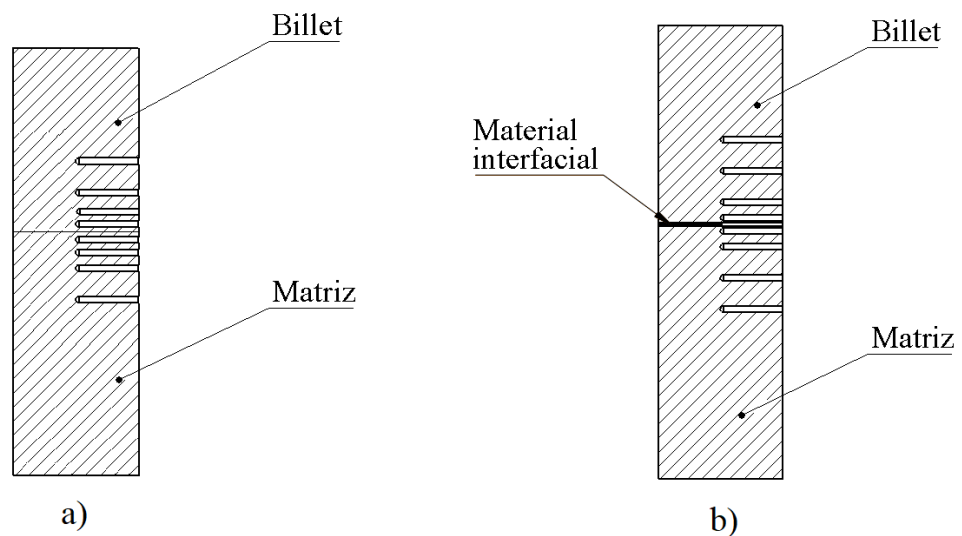


Figura 30. Configuração utilizada nos testes de transferência de calor pelo tempo de contato, a) sem máscaras de proteção e b) com máscara de proteção.

O teste de transferência de calor pelo tempo de contato foi executado, aquecendo as geratrizes até a temperatura de 950°C , e posterior monitoramento da temperatura nos corpos de prova pelo uso dos termopares. Assim, enquanto ocorria a estabilização da temperatura nos corpos de prova, interpretava-se que uma distribuição homogênea de temperatura no material

havia sido atingida. Após, a geratriz era posicionada sobre a matriz de forjamento agindo somente o seu próprio peso, ou seja, sem aplicação de força externa. A geratriz era então mantida nesta configuração por pelo menos 30min. As temperaturas foram registradas nas posições apresentadas na Figura 29. O tempo de transferência dos Cp's para a matriz foi de 7s. A metodologia aplicada no teste de transferência de calor pelo tempo de contato pode ser observada na Figura 31.

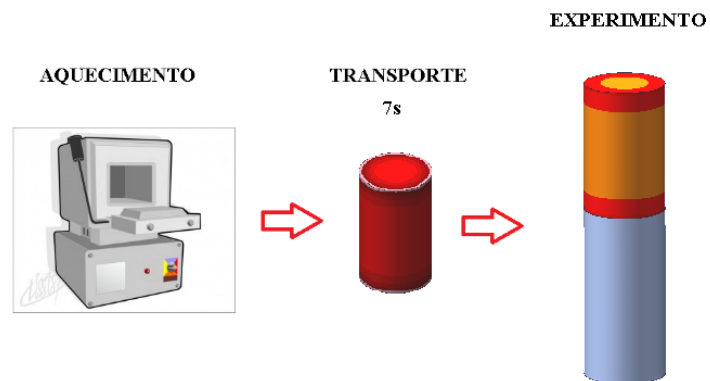


Figura 31. Visualização esquemática das etapas do teste de transferência de calor pelo tempo de contato.

Para a execução do teste de transferência de calor pelo tempo de contato foram utilizados, além do contato direto geratriz\matriz, diferentes materiais, conforme Figura 32. Estes materiais foram depositos na interface de contato visando verificar a influência destes na transferência de calor. A Tabela 1 apresenta os materiais testados, bem como suas características e condutividade térmica.

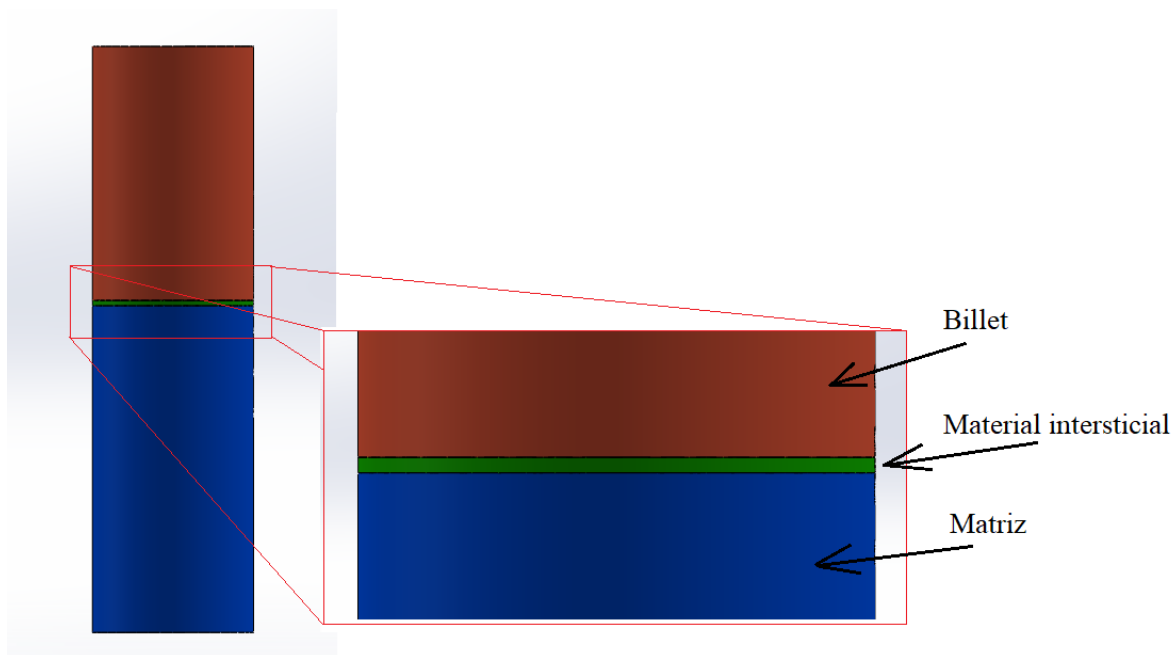


Figura 32. Detalhe da configuração utilizada no teste com meio interfacial.

Tabela 1. Materiais utilizados nos testes de transferência de calor pelo tempo de contato.

Material	Característica	Condutividade térmica k - [W·m⁻¹·K⁻¹]
Grafite em pó	Amplamente utilizado para conformação a quente e a morno.	Varia conforme a direção de medição podendo estar entre 80 e 160 (Jaszczak)
Lubrodal AT CR6	Lubrificante grafitado, solúvel em água. É utilizado no forjamento a quente de peças de aço-carbono.	*
Óxido de alumínio (Al₂O₃)	Material cerâmico, utilizado em aplicações que necessitam de isolamento térmico e elétrico.	14 – 30 (Alumina (Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃))

*Não fornecido.

Os materiais utilizados, conforme Tabela 1, foram depositados em uma fina camada de aproximadamente 1mm de espessura. Os materiais em pó antes de serem utilizados foram

submetidos a uma classificação granulométrica por uma peneira de 100 mesh. Como o lubrificante LUBRODAL AT CR6 é fornecido diluído em água, esta não foi classificado conforme os materiais em pó e sim apenas aplicando uma fina camada desta pasta sobre a interface de contato.

Foi utilizada como meio interfacial uma chapa de aço DIN 22MnB5 fazendo uma analogia à aplicação das máscaras de proteção, conforme apresentado previamente na seção 2.2.1. A chapa de aço possuía um canal para o monitoramento da temperatura através de termopares e sua geometria é observada conforme Figura 33.

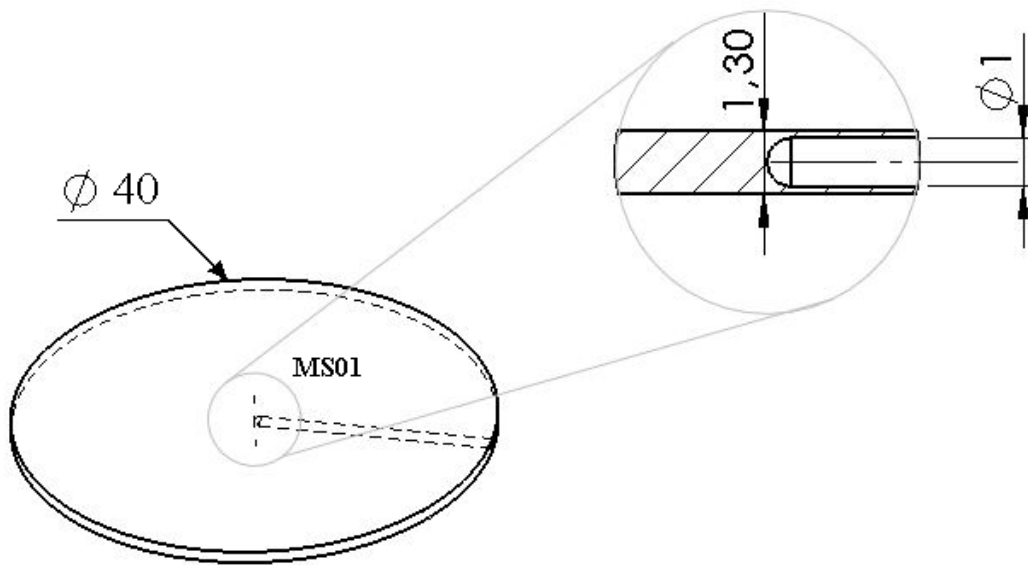


Figura 33. Geometria da chapa de aço utilizada como meio interfacial no teste de transferência de calor pelo tempo de contato.

3.2 TESTES DE FORJAMENTO EM MATRIZ ABERTA

De modo a verificar experimentalmente a influência do uso de máscaras metálicas na carga térmica das matrizes de forjamento a quente foram realizados testes de forjamento a quente em matriz aberta com e sem o uso de máscaras metálicas. As respectivas temperaturas foram monitoradas em pontos distintos. Os experimentos de forjamento foram realizados conforme parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados de teste de forjamento

Velocidade da prensa	3,5 [mm/s]
Tempo de transferência forno/Prensa	5,0 [s]
Deformação verdadeira [ϕ]	0,55 [-]
Temperatura Geratriz	930 [°C]
Temperatura Matriz	25 [°C]

Durante a execução dos experimentos, a temperatura foi monitorada em pontos definidos na configuração experimental. Os perfis de temperatura registrados foram então utilizados para a modelagem inversa. Os testes experimentais contam com a seguinte configuração: Figura 34b) matriz superior, matriz inferior, geratriz, máscara metálica, e célula de carga, Figura 35. A Figura 34 apresenta uma representação esquemática do experimento realizado.

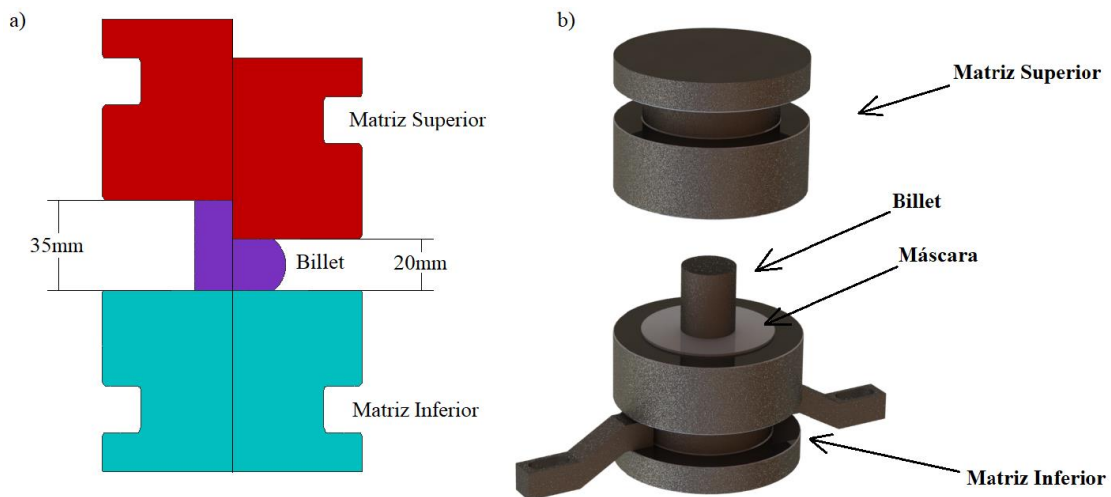


Figura 34. a) Esquema do teste de forjamento, posição inicial e final de forjamento, b) componentes.

Para a execução dos testes de forjamento foi utilizada uma prensa hidráulica EKA Modelo PKL40, conforme Figura 35, a qual possui capacidade máxima de 400kN e velocidade de 2,5mm/s. Integrado a mesa superior encontra-se a célula de carga utilizada para a aquisição dos valores de forças de forjamento.



Figura 35. Prensa EKA utilizada nos experimentos de forjamento.

As temperaturas foram registradas e serviram para uma posterior modelagem inversa. O objetivo desta modelagem inversa é obter os coeficientes de transferência de calor para o caso do forjamento com e sem máscaras metálicas. Ademais, estes experimentos procuraram demonstrar o impacto das máscaras metálicas no perfil de temperatura das matrizes de forjamento. Na Figura 36 é demonstrada a configuração inicial de ensaio para medição das temperaturas nas matrizes de forjamento.



Figura 36. Matriz inferior instrumentada com termopares tipo K.

Para os experimentos de forjamento foram realizados seis testes. Destes, três foram realizados com o uso de máscaras metálicas e três foram realizados sem o uso das máscaras metálicas. Os testes de forjamento foram efetuados sem o uso de lubrificantes de modo a não influenciar nos valores das temperaturas e alterar os valores nos coeficientes de transferência de calor para cada caso.

Os testes envolveram uma série de etapas visando garantir a repetitividade nos testes. As etapas são apresentadas na Figura 37.

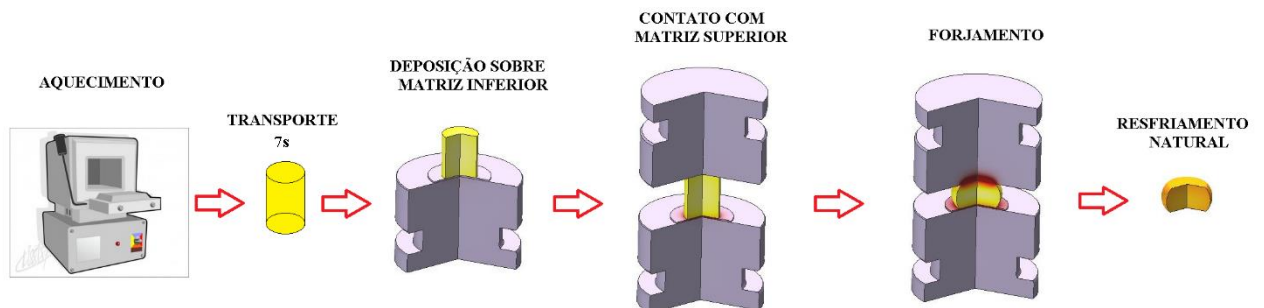


Figura 37. Modelo esquemático das etapas dos testes de forjamento.

Os testes de forjamento com máscaras metálicas foram realizados com uma chapa de aço de 1,3mm de espessura e 50mm de diâmetro. As máscaras possuíam um canal para a inserção de um termopar para monitorar as temperaturas durante os experimentos de forjamento. Na figura 38, é observado em detalhe o local de monitoramento da temperatura pelo termopar tipo K inserido no interior da máscara metálica.

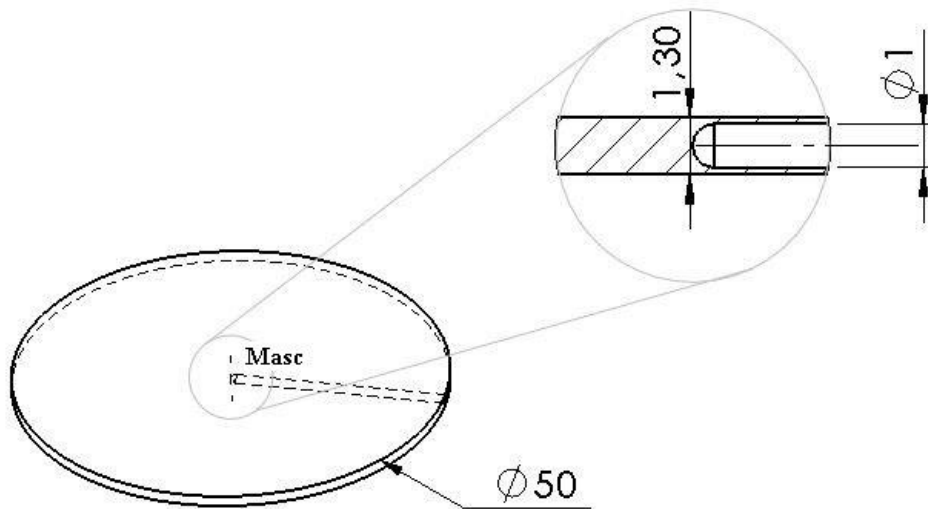


Figura 38. Detalhe do local de medição da temperatura.

As matrizes utilizadas possuem geometria plana circular com diâmetro de 100mm e uma altura de 70mm. As matrizes possuem em sua extremidade um rasgo usinado para fixação na mesa da prensa hidráulica. Os corpos de prova possuem um diâmetro de 29mm e uma altura de 35mm.

As temperaturas, tanto nas matrizes quanto na geratriz, foram monitoradas através de termopares tipo K encapsulados com 1,00 e 2,00mm de diâmetro respectivamente. As posições de medição são apresentadas na Figura 39.

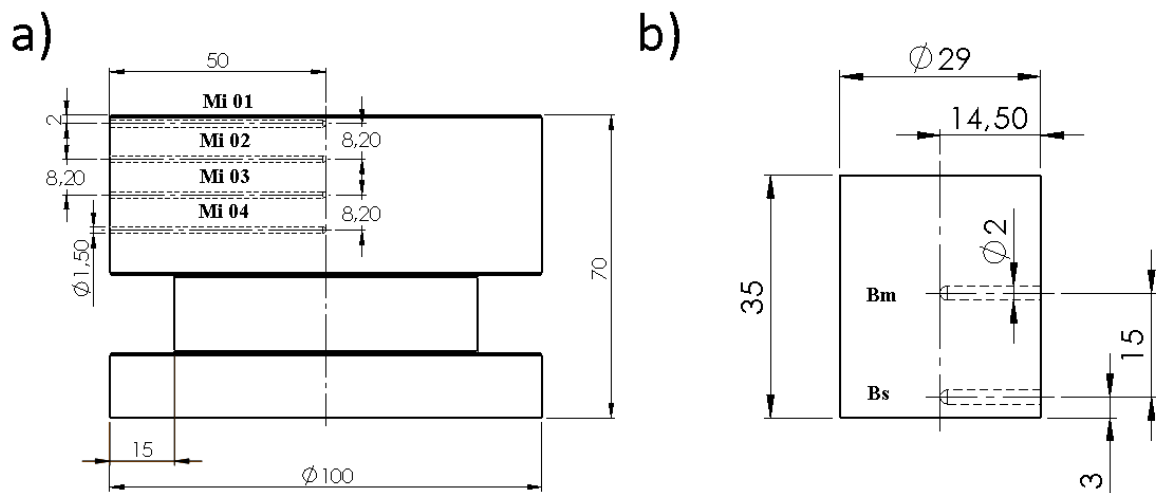


Figura 39. Posições de medição da temperatura, a) matriz e b) geratriz.

A posição dos pontos de medição na matriz inferior são os mesmos para a matriz superior, conforme Figura 39 (a). Os locais de medição objetivam acompanhar a evolução da transferência de calor antes e após o contato com a geratriz. A distância do termopar superior na matriz é de 2mm, visto que esta deve ser a menor possível, pois conforme a distância da interface aumenta, maior é a dificuldade para o registro de eventos interfaciais.

As temperaturas experimentais correspondem aproximadamente às temperaturas do processo de forjamento a quente em ambiente industrial. O produto semiacabado a ser forjado é conformado a temperaturas acima da temperatura de recristalização, isto é, entre 900°C e 1200°C para o aço. Neste trabalho foi determinada a temperatura de 950°C para os testes de forjamento. As matrizes foram mantidas em temperatura ambiente, ou seja, entre 23°C e 24°C. Para adquirir o valor exato da temperatura ambiente nos experimentos, foi realizado monitoramento da temperatura ambiente com um termopar tipo K.

Os experimentos de forjamento em matriz aberta seguiram o procedimento: avanço da prensa até o valor determinado, recuo da matriz superior, e retirada à geratriz da matriz inferior. Este procedimento visa não influenciar os valores de temperatura do forjamento com os da transferência pelo resfriamento da geratriz já deformada

3.2.1 Materiais Utilizados

Matrizes:

O material utilizado para as matrizes no teste de transferência de calor pelo tempo de contato foi o Aço para trabalho a quente AISI H13 (DIN X40CrMoV5-1). Este aço pertence ao grupo dos aços CrMoV. Como características possui uma excelente combinação entre dureza e resistência à fratura, com uma manutenção destas propriedades em temperaturas elevadas; boa resistência a choques térmicos e às trincas por fadiga térmica (Benedyk, 2008). A composição química do aço AISI H13 é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Composição química do aço AISI H13 em teor em peso %. (Metals Handbook, 1989)

C	Mn	Si	Cr	Mo	V
0,38	0,30	1,00	5,25	1,5	1,00

Corpos de Prova:

Nos experimentos, o material utilizado para as geratrizes foi o aço estrutural AISI 1045 (DIN C45). Este aço não tratado termicamente é adequado para componentes expostos a esforços médios. Exemplos de áreas de aplicação são a indústria automotiva, indústria de peças e equipamentos como também na construção de máquinas ou instalações. A composição química do aço AISI 1045 é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4. Composição química do aço AISI 1045 em teor em peso%. (Metals Handbook, 1990)

C	Si	Mn	P	S
0,42 – 0,50	0,40	0,50 – 0,80	0,045	0,045

O comportamento plástico do material C45_h1, disponível no software *SIMUFACT FORMING*, é baseado no modelo de Hensel e Spittel, conforme Eq. 8.

$$K_f = A \cdot e^{-m1T} \varphi^{m2} \dot{\varphi}^{m3} \varphi^{\frac{m4}{\varphi}} (1 + \varphi)^{m5T} \varphi^{m7\varphi} \dot{\varphi}^{m8T} T^{m9} \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde

K_f = tensão de escoamento [Mpa];

φ = deformação verdadeira [-];

$\dot{\varphi}$ = velocidade de deformação [S^{-1}];

T = temperatura de deformação [K];

m_1 , m_9 definem a sensibilidade do material à temperatura, m_5 define a temperatura e tensão de acoplamento, m_8 temperatura de acoplamento e taxa de deformação, m_2 , m_4 e m_7 definem a sensibilidade do material à deformação e m_3 depende da sensibilidade do material à velocidade de deformação.

Os coeficientes que descrevem o comportamento do material C45_h1, conforme o modelo de Hensel e Spittel, Eq. 8, é fornecido na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros da equação de Hansel-Spittel, para o aço C45_h1.

<i>A</i>	<i>m1</i>	<i>m2</i>	<i>m3</i>	<i>m4</i>
1521,31	-0,0027	-0,1265	0,1454	-0,05958

Os valores apresentados na Tabela 5 são válidos para o intervalo de deformações (φ) entre 0,5 a 1,5, velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) entre 0,01 e 500 e temperaturas (T) entre 700 e 1250°C.

O material utilizado para as máscaras neste trabalho foi o aço ao boro DIN 22MnB5. Este aço para estampagem a quente possui uma formabilidade particularmente boa e elevada dureza após tratamento térmico. A alta resistência é alcançada pela adição de pequenas proporções de boro como elemento de liga. Geralmente, este aço é empregado após estampagem a quente em componentes estruturais e de segurança do ramo automotivo.

Tabela 6. Composição química do aço DIN 22MnB5 em teor em peso %. (Spittel, et al., 2009)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,19-0,25	0,00-0,40	1,10-1,40	0,000-0,025	0,000-0,015	0,15-0,35
Al	B	Ti			
0,020-0,060	0,0008-0,0050	0,02-0,05			

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para realizar os experimentos de forjamento, foram primeiramente aquecidos os Cp's até a temperatura 950°C e mantidos até homogeneização. As temperaturas na geratriz foram monitoradas pelos termopares previamente inseridos. Após o tempo de aquecimento da geratriz, esta foi depositada sobre a matriz inferior e então realizado o ensaio de forjamento. O tempo de transporte entre forno e matriz foi de aproximadamente 7s para os experimentos de transferência de calor pelo tempo de contato e 5s nos experimentos de forjamento. Nos experimentos com o uso de máscaras a geratriz foi posicionada sobre a máscara que estava previamente posicionada sobre a matriz inferior. Após o forjamento, aguardava-se um intervalo de tempo para que a matriz inferior resfriasse, mantendo a temperatura inicial da matriz inferior para todos os testes executados. As temperaturas em todos os testes foram monitoradas tanto na geratriz, nas matrizes e nas máscaras. Foram utilizados para a aquisição dos dados de temperatura o módulo de aquisição e registro de dados *FieldLogger*® fornecido pela *NOVUS*©. Para os dados de força foi utilizado o sistema de aquisição de dados *Spider8*® fornecido pela *HBM*©. A configuração para a aquisição dos valores de temperatura é apresentada esquematicamente na Figura 40.

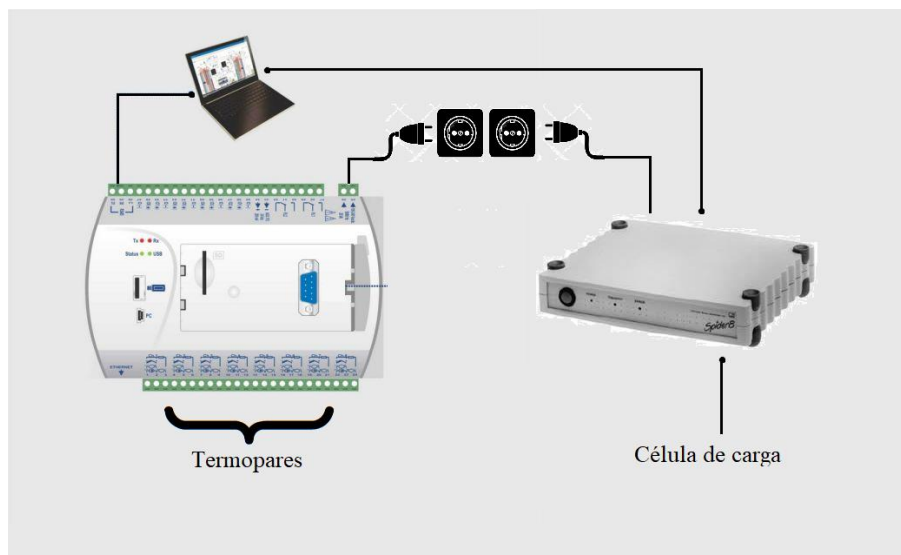


Figura 40. Configuração utilizada nos experimentos de forjamento.

Para os experimentos de transferência de calor pelo tempo de contato apenas a aquisição dos dados de temperatura foi registrada, visto que a força aplicada era somente a da massa da geratriz aquecida. A temperatura ambiente na realização, tanto dos testes de forjamento quanto

da transferência de calor, manteve-se em aproximadamente 23°C. Nos experimentos os valores monitorados da força de forjamento foram apenas utilizados para verificar se os testes com e sem máscara a força de forjamento apresentavam valores próximos para todos os experimentos.

3.4 MODELO NUMÉRICO EM ELEMENTOS FINITOS

Um modelo numérico em Elementos Finitos (FEM) foi desenvolvido com a finalidade de determinar os valores dos coeficientes de transferência de calor para os experimentos realizados. Este modelo foi utilizado para a determinação dos parâmetros térmicos de transferência de calor através de análise inversa. O software utilizado para a montagem do modelo numérico foi o *SIMUFACT FORMING 15* da fabricante *MSC Softwares*. A utilização de análise inversa foi proposta visando obter os respectivos valores dos coeficientes de transferência de calor para o caso com e sem o uso de máscaras metálicas.

3.4.1 Estrutura do Modelo Em Elementos Finitos (FEM) e Parâmetros de Simulação

Para replicar via elementos finitos os experimentos físicos, o modelo foi dividido em simulações individuais. Estas simulações individuais representam cada evento ocorrido nos experimentos reais, sendo estes: aquecimento, transporte e deposição sobre a matriz.

3.4.2 Modelo Numérico Para o Teste de Transferência de Calor Pelo Tempo de Contato

Para a criação do modelo de simulação numérica do experimento de transferência de calor pelo tempo de contato, o modelo físico foi dividido em partes, sendo a parte 1, o transporte da peça aquecida do forno para a matriz e a parte 2 a deposição da peça aquecida sobre a matriz. A segmentação do modelo físico é apresentada na Figura 41.

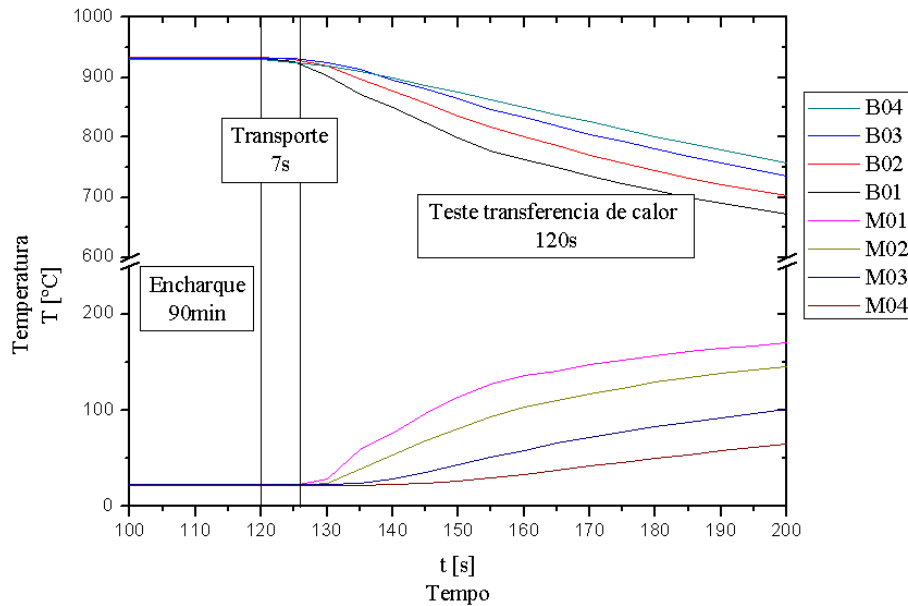


Figura 41. Perfil de temperatura e partes segmentadas no teste de transferência de calor para o experimento com contato direto em matriz temperada.

A Parte 1 é mostrada como uma simples simulação de resfriamento. A peça de trabalho é submetida ao resfriamento ao ar numa temperatura de 23° C. Para este propósito, o tempo de resfriamento é lido a partir das curvas de temperatura dos experimentos e é limitado ao intervalo em que somente a temperatura da peça de trabalho muda e a temperatura na matriz permanece constante. Com o intuito de diminuir o esforço computacional, e considerando seus efeitos desprezíveis, a amostra é definida na simulação sem os furos designados aos termopares.

Os parâmetros gerais de entrada para as simulações de transferência de calor são mostrados na Tabela 7. As geometrias dos corpos correspondem às geometrias usadas nos experimentos reais. No entanto, conforme previamente descrito, os furos na matriz e geratriz são omitidos.

Tabela 7. Parâmetros de simulação utilizados em todos os modelos numéricos realizados.

Parâmetro		Valor utilizado
Temperatura ambiente	T	23 [°C]
Coefficiente de Atrito (modelo de Coulomb)	μ	0
Coefficiente de emissividade Geratriz	ϵ_g	0.77
Coefficiente de emissividade Máscara	ϵ_m	0.77

Coefficiente de emissividade Matriz	ϵ_a	0.77
Coefficiente de transferência de calor para o ambiente	HTC	20 [W/(m ² ·K)]

A Tabela 8 descreve os parâmetros utilizados para a criação do modelo do processo de transferência entre forno e matriz para a geratriz.

Tabela 8. Parâmetros de simulação utilizados no modelo de transporte.

Parâmetros		Valor utilizado
Tipo de simulação	[-]	Resfriamento 3D_FE
Material da Geratriz	[-]	C45_h1 (Biblioteca do software Simufact)
Tipo de elemento	[-]	Hexahedral
Tamanho do elemento	[mm]	1,99
Número de elementos	[-]	15628
Tempo de resfriamento	[s]	7
Temperatura inicial	[°C]	950
Pontos monitorados	[-]	B01, B02, B03 e B04.
Intervalo de tempo de aquisição	[s]	1

Durante o resfriamento, o perfil de temperatura no corpo da amostra é estabelecido conforme Figura 42.

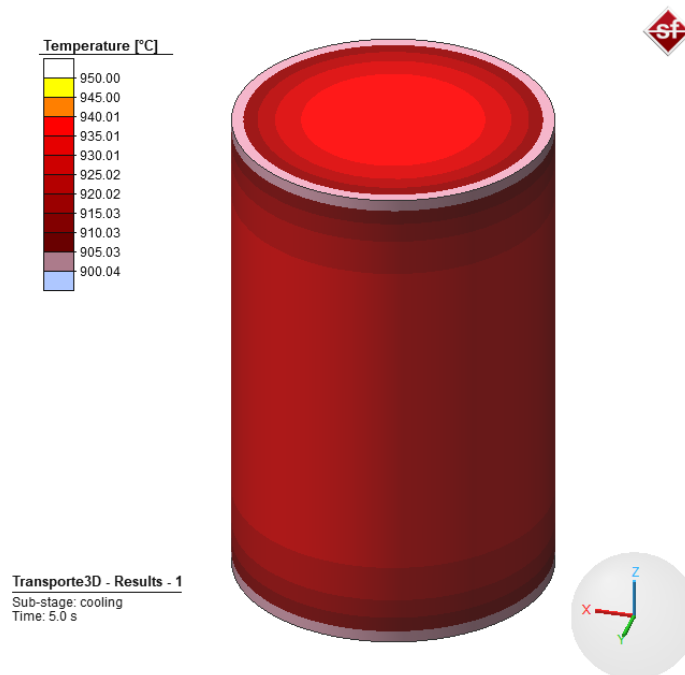


Figura 42. Perfil de temperatura da amostra no final do transporte.

O perfil de temperatura obtido durante do processo de resfriamento na geratriz pode ser importado para o processo da Parte 2 da simulação, juntamente com a malha e a geometria do corpo após a conclusão da simulação.

Com a importação do resultado da análise do transporte do forno para a matriz, somente então é iniciada a simulação de transferência de calor sob condição de contato. A Figura 43 ilustra o modelo de transferência de calor pelo tempo de contato no estado inicial considerando os valores de temperatura da geratriz do modelo de transferência.

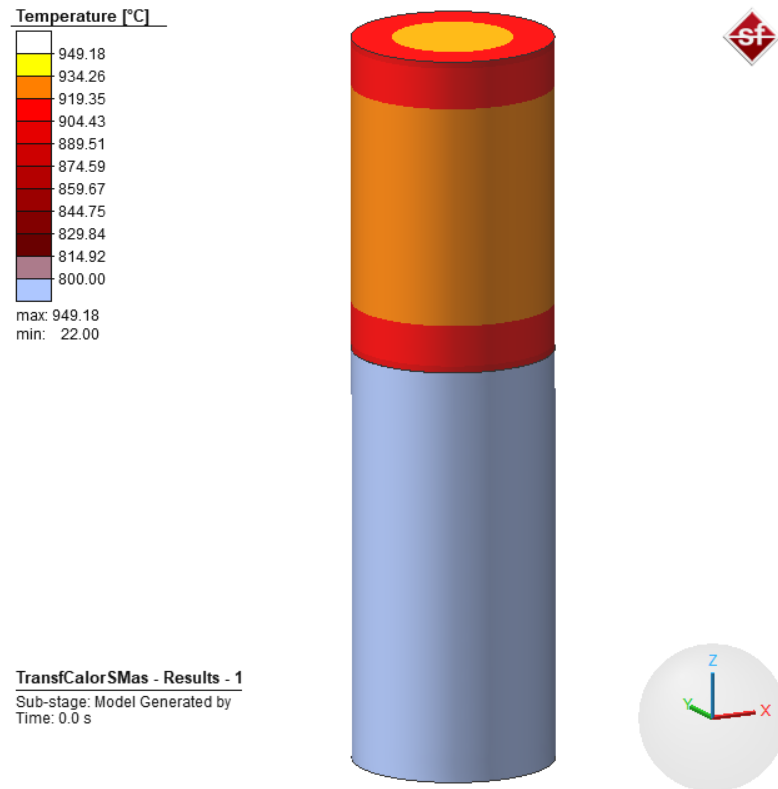


Figura 43. Modelo de transferência de calor pelo tempo de contato no estado inicial de simulação.

Para simular a Parte 2, os componentes da montagem experimental considerados na Parte 1, incluindo seus resultados, foram importados. A estrutura geral do modelo no início da simulação de resfriamento sob condição de contato é mostrada na Figura 31. A estrutura do modelo numérico com e sem o uso de máscaras metálicas é observado na Figura 32. O tempo de contato da simulação é de 150 segundos. Os parâmetros de simulação são semelhantes aos do modelo de transferência entre forno e matriz, conforme Tabela 9. A simulação para este estágio é, novamente, um processo de resfriamento 3D. O modelo numérico para o início do experimento ($t=0$) com a geratriz importada do modelo de resfriamento para o transporte, é observado na Figura 44.

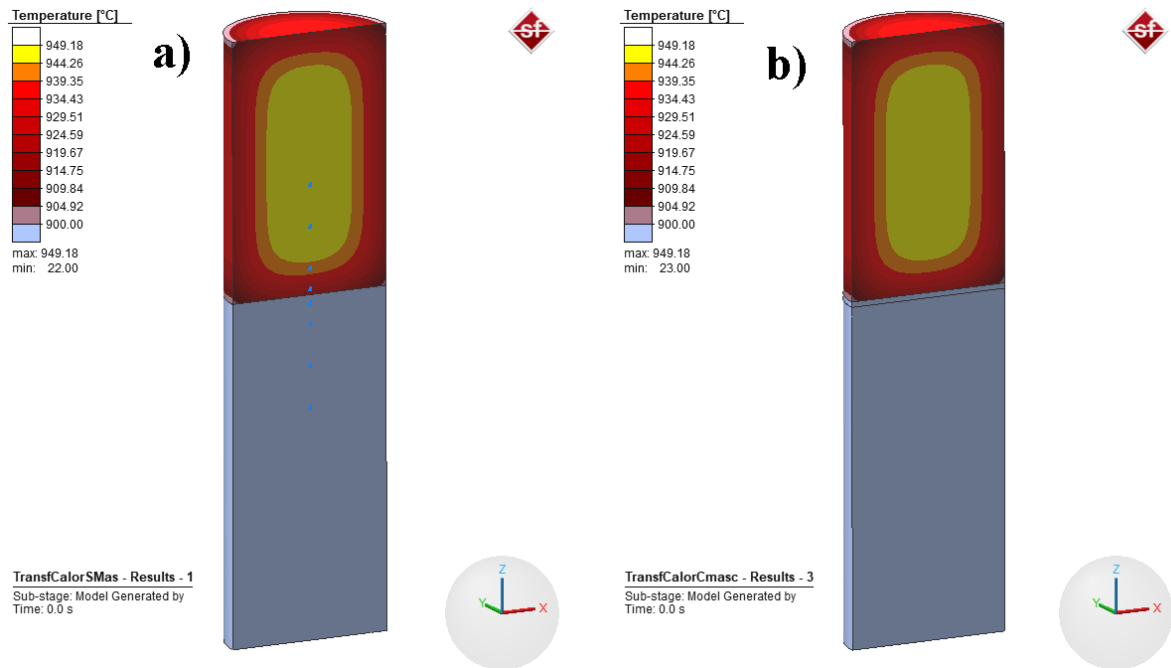


Figura 44. Modelo numérico após ser importado do processo de transporte a) sem máscara e b) com máscara, no tempo $t=0$ do processo de transferência de calor.

Os parâmetros durante o processo de resfriamento pelo tempo de contato são mostrados na Tabela 7. A amostra, a máscara metálica e a matriz inferior são consideradas como um corpo rígido com transferência de calor.

Tabela 9. Parâmetros utilizados nos modelos de transferência de calor pelo tempo de contato.

Tipo de simulação		Resfriamento 3D_FE
GERATRIZ (modelo importado)		
Parâmetros		Valor utilizado
Material	[-]	C45_h1 (BibliotecaSimufact)
Tipo de elemento	[-]	Hexahedral
Tamanho do elemento	[mm]	1,99
Número de elementos	[-]	15628
Temperatura inicial	[°C]	950
Pontos monitorados	[-]	B01, B02, B03 e B04.
Intervalo de tempo de aquisição	[s]	1
MÁSCARA METALICA		
Material	[-]	22MnB5 (Biblioteca Simufact)

Coef. Transferência de calor (matrizes)	[W/m.K]	Constante com a temperatura 2500
Tipo de elemento	[-]	Hexahedral
Tamanho do elemento	[mm]	0,43
Número de elementos	[-]	30000
Temperatura inicial	[°C]	23
Pontos monitorados	[-]	MS01
Intervalo de tempo de aquisição	[s]	1
MATRIZ INFERIOR		
Material	[-]	X40CrMoV5-1 (Biblioteca Simufact)
Coef. Transferência de calor (matrizes)	[W/m.K]	1500
Tipo de elemento	[-]	Hexahedral
Tamanho do elemento	[mm]	1,28
Número de elementos	[-]	17998
Temperatura inicial	[°C]	23
Pontos monitorados	[-]	M01, M02, M03 e M04.
Intervalo de tempo de aquisição	[s]	1

3.4.3 Modelo numérico para o teste de forjamento a quente

O modelo numérico para o experimento de forjamento foi desenvolvido utilizando os mesmos materiais do modelo do experimento do tempo de contato; somente as geometrias da geratriz, matrizes e máscaras metálicas foram alteradas. As geometrias do modelo numérico foram simplificadas em modelos sem as furações para os termopares.

No modelo numérico para o teste de forjamento também foi realizado a segmentação do experimento em submodelos. As partes segmentadas do modelo físico podem ser observadas conforme Figura 45.

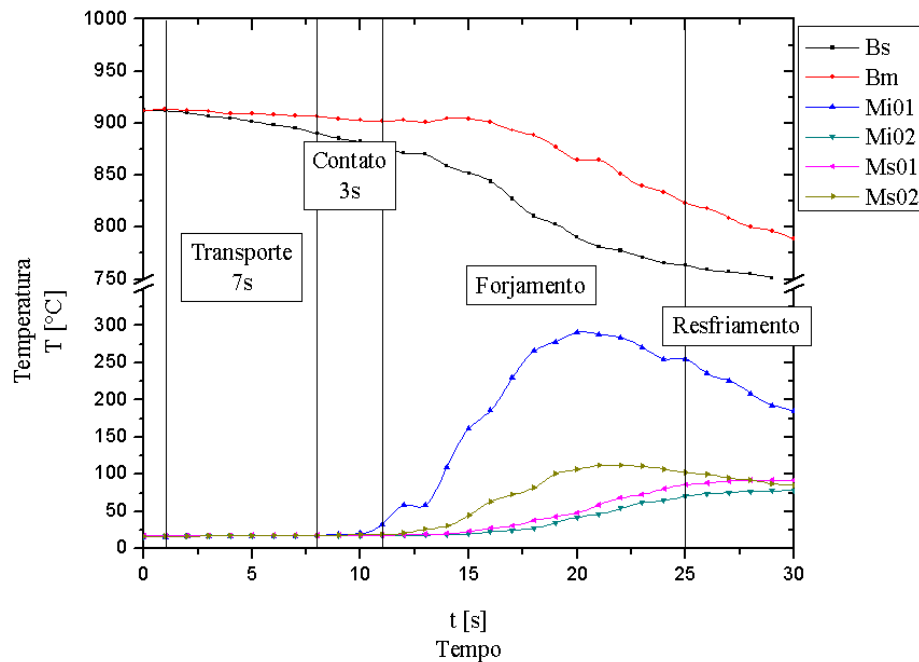


Figura 45. Segmentos do modelo físico para o caso do experimento de forjamento sem uso de máscaras.

O modelo numérico para o processo de transporte utilizou os mesmos parâmetros de entrada referentes ao experimento de transferência de calor pelo tempo de contato. As matrizes e máscaras metálicas foram definidas como corpos rígidos com transferência de calor, enquanto que os materiais da geratriz, máscara metálica e matrizes foram os mesmos utilizados no modelo de transferência de calor pelo tempo de contato. Na Tabela 10 são apresentados os demais parâmetros utilizados no modelo numérico para o forjamento.

Tabela 10. Parâmetros utilizados no modelo numérico do processo de forjamento em matriz aberta.

Tipo de simulação		Forjamento a quente 3D_FE
Prensa Hidráulica Velocidade constante	[mm/s]	2,5
Intervalo de tempo de aquisição	[s]	1
Temperatura ambiente	[°C]	23
Coeficiente de Atrito Coulomb	[μ]	0.3
GERATRIZ (modelo importado)		
Material	[-]	C45_h1 (Biblioteca Simufact)
Coef. Transferência de calor (ambiente)	[W/m.K]	20

Tipo de elemento	[-]	Hexahedral
Tamanho do elemento	[mm]	1,99
Número de elementos	[-]	15628
Temperatura inicial	[°C]	930
Pontos monitorados	[-]	Bm, Bs.
MÁSCARA METALICA		
Material	[-]	22MnB5 (Biblioteca Simufact)
Coef. Transferência de calor (matrizes)	[W/m.K]	1200
Coef. Transferência de calor (ambiente)	[W/m.K]	20
Tipo de elemento	[-]	Hexahedral
Tamanho do elemento	[mm]	0,43
Número de elementos	[-]	30000
Temperatura inicial	[°C]	23
Pontos monitorados	[-]	Masc
MATRIZ INFERIOR		
Material	[-]	X40CrMoV5-1 (Biblioteca Simufact)
Coef. Transferência de calor (matrizes)	[W/m.K]	1500
Coef. Transferência de calor (ambiente)	[W/m.K]	20
Tipo de elemento	[-]	Hexahedral
Tamanho do elemento	[mm]	1,28
Número de elementos	[-]	17998
Temperatura inicial	[°C]	23
Pontos monitorados	[-]	Mi01, Mi02, Mi03 e Mi04.
MATRIZ SUPERIOR		
Material	[-]	X40CrMoV5-1 [Biblioteca Simufact]
Coef. Transferência de calor (matrizes)	[W/m.K]	1500
Coef. Transferência de calor (ambiente)	[W/m.K]	20
Tipo de elemento	[-]	Hexahedral
Tamanho do elemento	[mm]	1,28
Número de elementos	[-]	17998
Temperatura inicial	[°C]	23
Pontos monitorados	[-]	Ms01, Ms02, Ms03 e Ms04.

No modelo numérico foram realizadas simulações com e sem o uso de máscaras metálicas visando determinar sua influência na carga térmica imposta sobre as matrizes de forjamento. Os valores da temperatura destas simulações foram comparados, e assim determinou-se seu impacto sobre o perfil térmico das matrizes.

3.4.4 Estrutura da Estratégica de Otimização

Para a determinação dos coeficientes de transferência de calor pelo tempo de contato foi utilizado a ferramenta de otimização presente no software *SIMUFACT FORMING 15*, da fabricante *MSC softwares*. Esta ferramenta utiliza algoritmos de comparação entre valores medidos e simulados para aproximar parâmetros específicos previamente definidos no software.

Resumidamente, uma identificação de parâmetro ocorre ao usar a aproximação de parábola. Um dado parâmetro, por exemplo, coeficiente de transferência de calor, é variado para ajustar um valor de resultado (temperatura da peça de trabalho) para um valor experimental desejado ou uma curva objetiva (tabela). A otimização busca ajustar o parâmetro para que o valor do resultado esteja dentro de um determinado intervalo para o valor objetivo.

Neste estudo foi definido como parâmetro de aproximação o coeficiente de transferência de calor entre as matrizes. Este foi definido com o valor inicial conforme consta na Tabela 8 e foram definidos como constante com a temperatura. Um exemplo pode ser observado na Figura 42 para o caso do HTC das matrizes de forjamento.

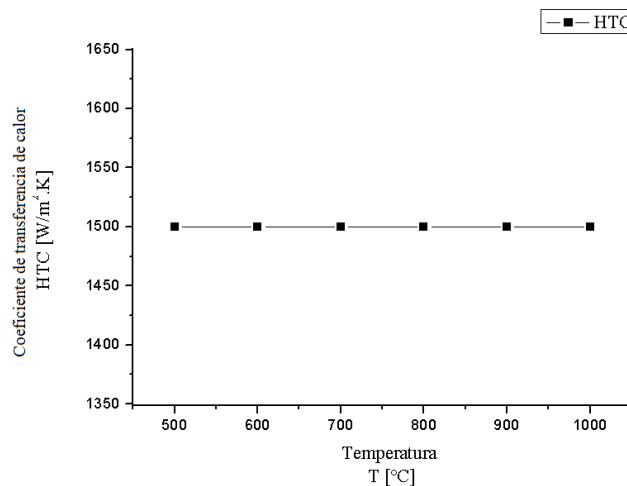


Figura 46. Estratégia aproximação utilizada nos modelos de otimização.

O parâmetro objetivo utilizado para todos os modelos foram os valores de temperatura obtidos de maneira experimental no modelo físico nos pontos M01e MS01 e para os modelos de transferência de calor pelo tempo de contato e Mi01 e Masc para os testes de forjamento.

Assim o software altera o valor do coeficiente de transferência de calor visando que o valor do resultado esteja dentro de um determinado intervalo para o valor objetivo. Para isso devem ser definidos sensores no modelo numérico em posições idênticas aos locais de medição de temperatura no modelo físico. A Figura 47 ilustra onde as partículas foram inseridas.

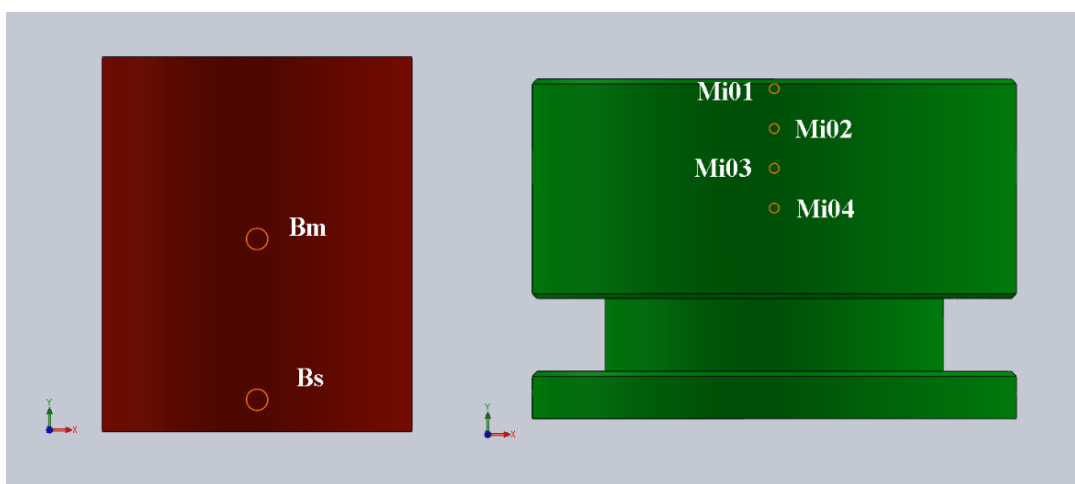


Figura 47. Posições das partículas utilizadas no modelo numérico para o teste de transferência de calor pelo tempo de contato.

Em virtude de o software ser principalmente desenvolvido para aplicações usuais de forjamento, onde as matrizes ficam em contato com a geratriz durante o forjamento, ao modelar a máscara de proteção como uma matriz com condução de calor, o modelo passará a ter em suas regiões de contato a matriz inferior em contato com a “matriz” máscara.

Neste caso, ao definir as propriedades de transferência de calor no software, este limita-se a tratar o coeficiente de transferência de calor como constante para a transferência de calor entre máscara e matriz. Assim, o modelo para o forjamento com mascaras passará a ter dois valores de coeficiente de transferência de calor interfacial, sendo um entre geratriz/máscara e outro entre máscara/matriz.

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Os resultados obtidos através da metodologia proposta são apresentados nos Capítulos 4.1 e 4.2.

4.1 MODELOS FÍSICOS

Os valores referentes aos experimentos foram organizados conforme o teste são apresentados nas seções 4.1.1, 4.1.2, 4.2.1 e 4.2.2.

4.1.1 Teste de transferência de calor pelo tempo de contato.

Os valores provenientes dos experimentos de transferência de calor pelo tempo de contato foram organizados e plotados pela temperatura (eixo y) em relação ao tempo (eixo x). Na Figura 48 são apresentados, os valores registrados de temperatura para o experimento com matriz sem tratamento superficial e submetida a contato direto.

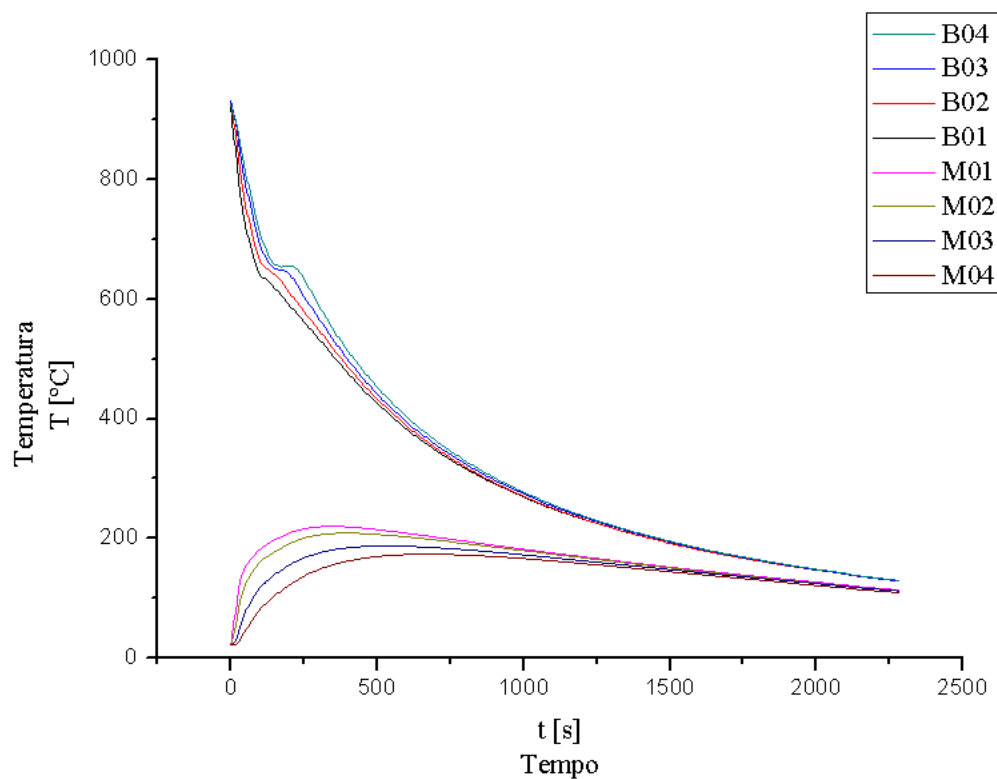


Figura 48. Perfil de temperatura para o teste de transferência de calor pelo tempo de contato para o caso de transferência com contato direto com matriz sem tratamento superficial.

Para os experimentos de transferência de calor pelo tempo de contato, para os casos da matriz submetida ao tratamento superficial de nitretação e sem o uso de material interfacial, foram observadas pequenas diferenças na carga térmica transmitida as matrizes. Na Figura 49 é apresentado o perfil térmico para o caso de contato direto e matriz submetida ao tratamento superficial de nitretação.

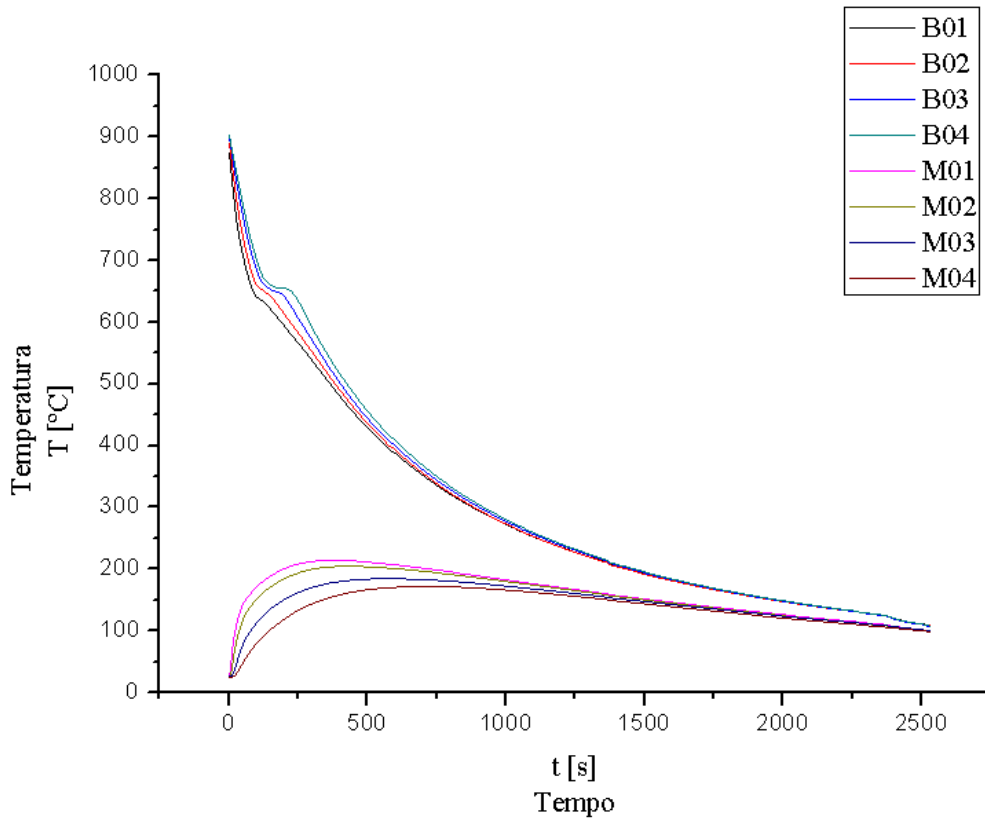


Figura 49. Perfil térmico para o caso com o uso de matrizes nitretadas e por contato direto.

Para o caso do uso de grafite em pó como material interfacial foi observado um aumento no perfil térmico das matrizes no teste de transferência de calor conforme Figura 50. Cabe ressaltar que o uso de grafite como lubrificante no processo de forjamento a quente contribui para a redução do atrito no processo. Tal lubrificante também possui alta resistência a elevadas temperaturas.

Foi também utilizado como material interfacial nos experimentos de transferência de calor pelo tempo de contato o lubrificante grafitado Lubrodal. Este lubrificante é designado como um desmoldante grafitado solúvel em água indicado para uso em processos de forjamento a quente. O perfil térmico para este experimento é apresentado na Figura 51.

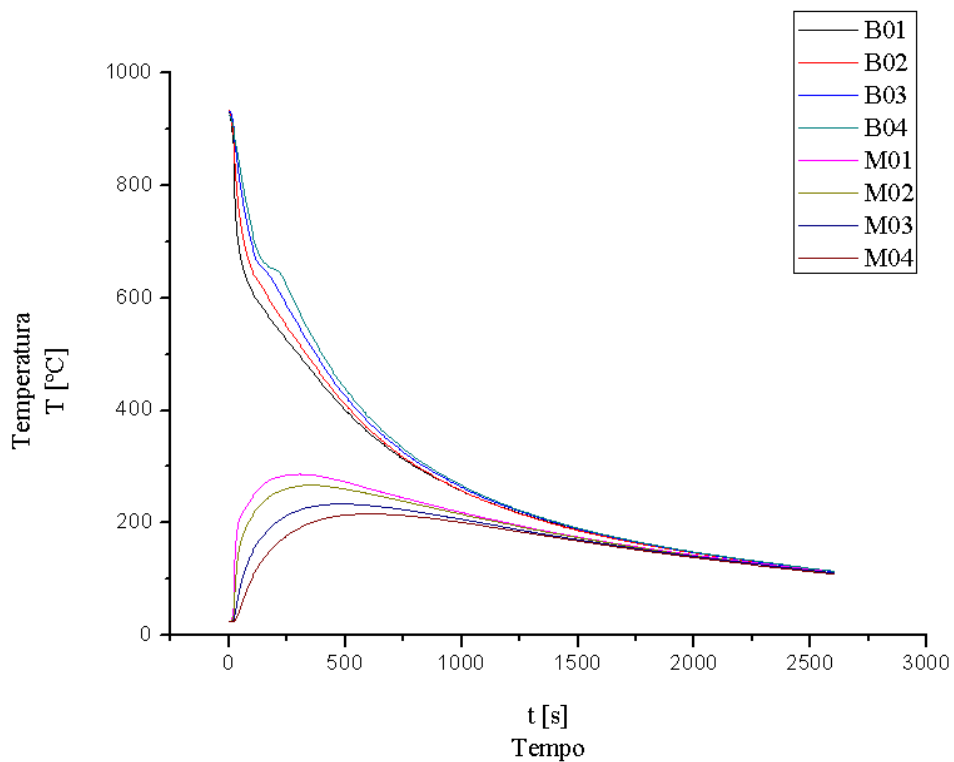


Figura 50. Perfil térmico amortecido no teste de transferência de calor com o uso de grafite como material interfacial.

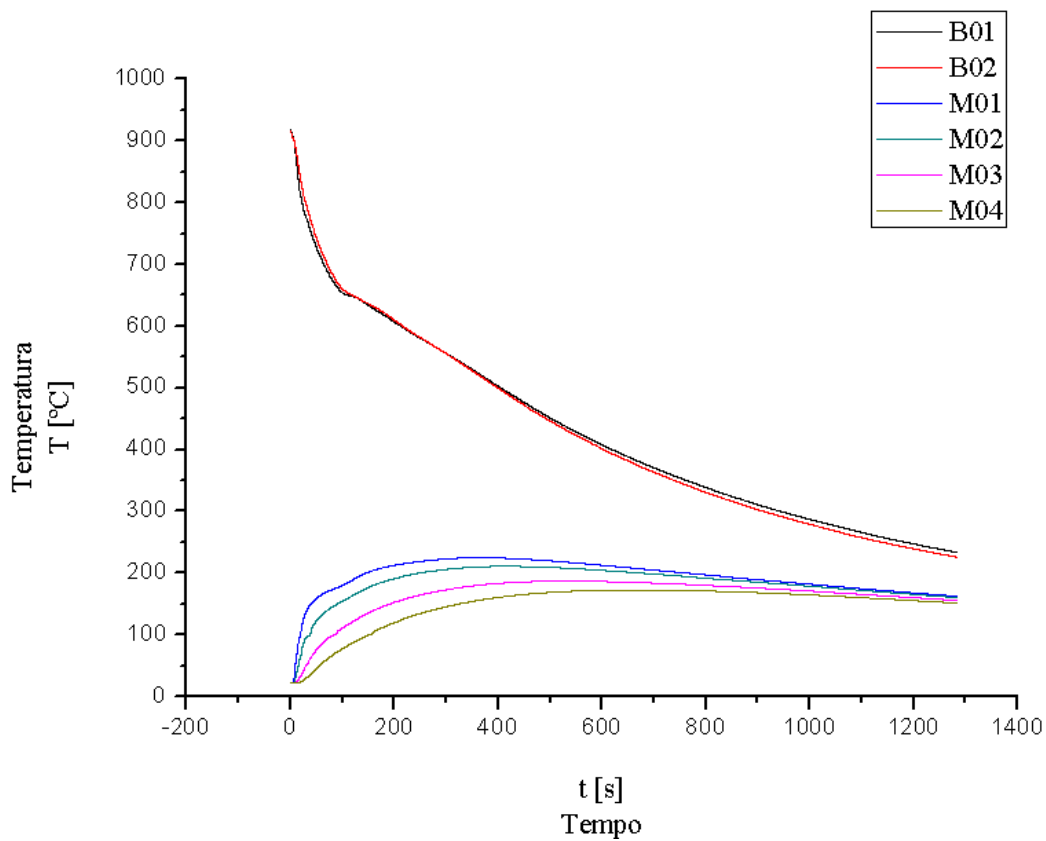


Figura 51. Perfil térmico de teste com o uso de Lubrodal como meio interfacial.

De modo comparativo ao perfil térmico dos experimentos anteriormente realizados, foi proposto o uso de um material isolante como meio interfacial. Este experimento serviu apenas como um comparativo entre os materiais utilizados. Para este propósito, o material escolhido foi o óxido de alumínio (Al_2O_3). O perfil térmico para este experimento é apresentado na Figura 52.

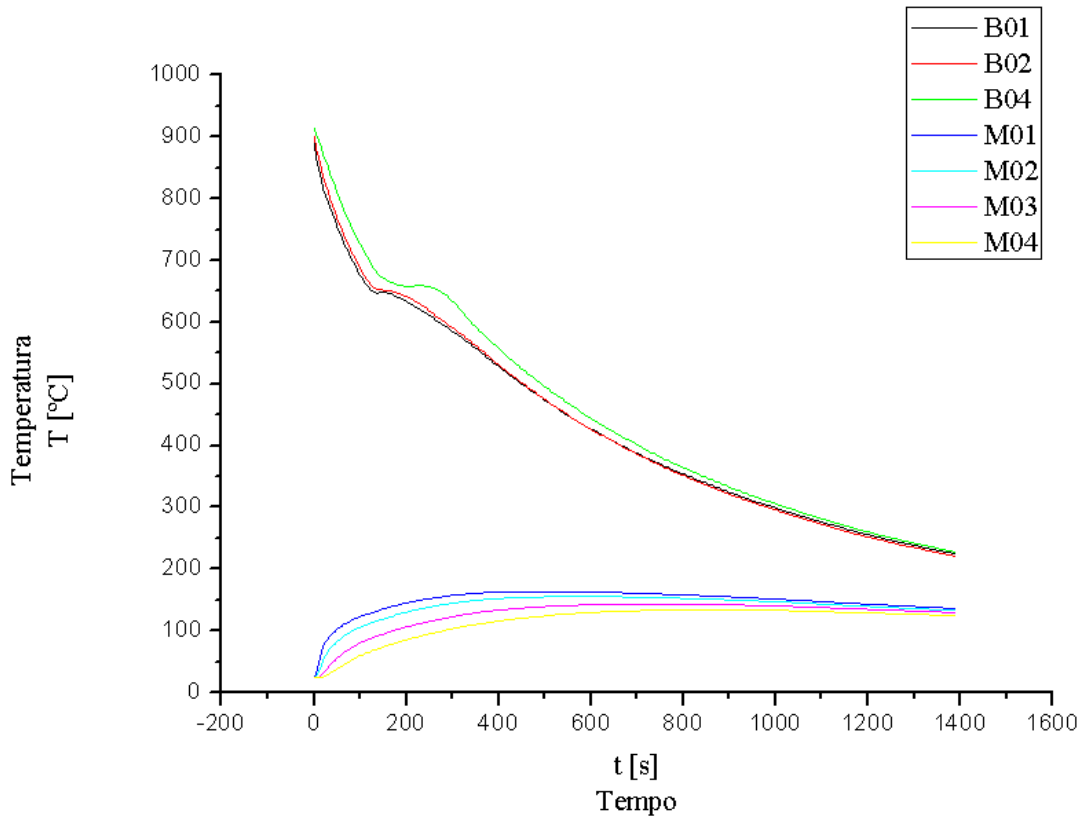


Figura 52. Perfil térmico do teste com o uso de Al_2O_3 como meio interfacial.

Como esperado, para o caso do experimento com Al_2O_3 como meio interfacial, é observado um impacto térmico discreto na matriz. Isto ocorre devido às suas características isolantes deste material.

Por fim realizou-se o experimento de transferência de calor utilizando como meio interfacial a chapa metálica utilizada como máscara de proteção. O perfil térmico amortecido na matriz e na máscara metálica é apresentado na Figura 53.

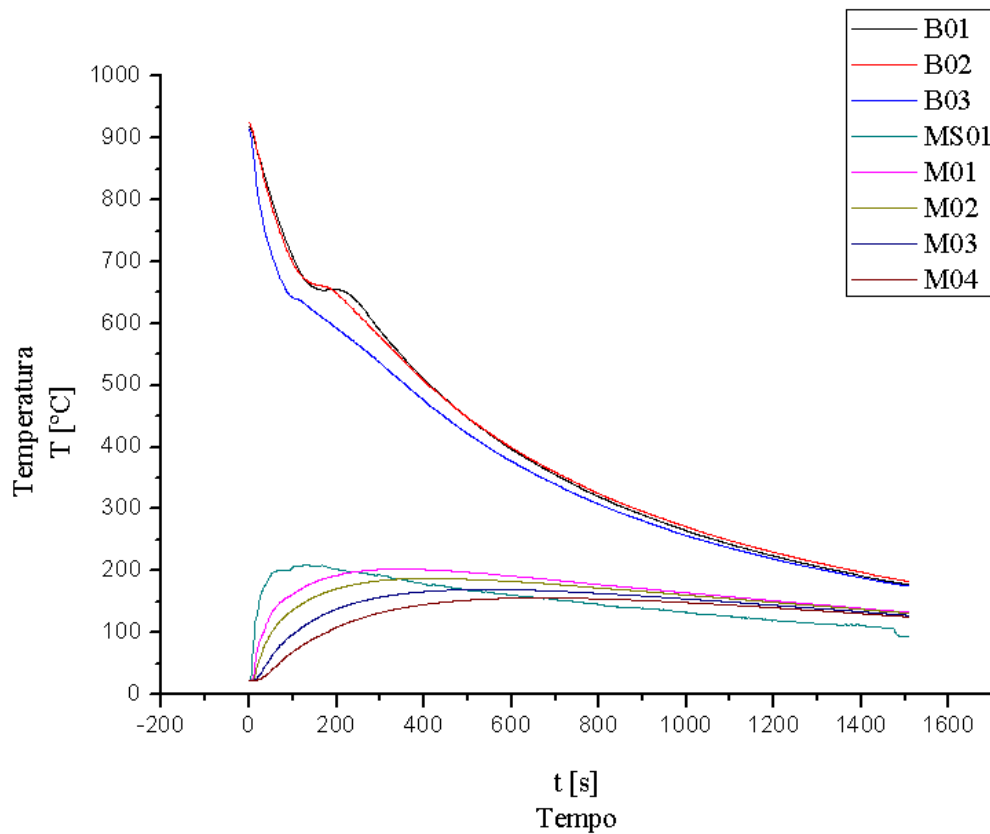


Figura 53. Perfil térmico do teste de transferência de calor com o uso de máscara metálica.

Quando comparado os testes de transferência de calor pelo tempo de contato, as temperaturas no ponto mais próximo a superfície da matriz de forjamento (ponto M01) demonstraram uma pequena diferença para o caso de contato direto.

Os valores de temperatura para o caso com e sem o uso de meio interfacial, nos experimentos onde foi utilizada a matriz com tratamento superficial e sem tratamento superficial, são apresentados na Figura 54.

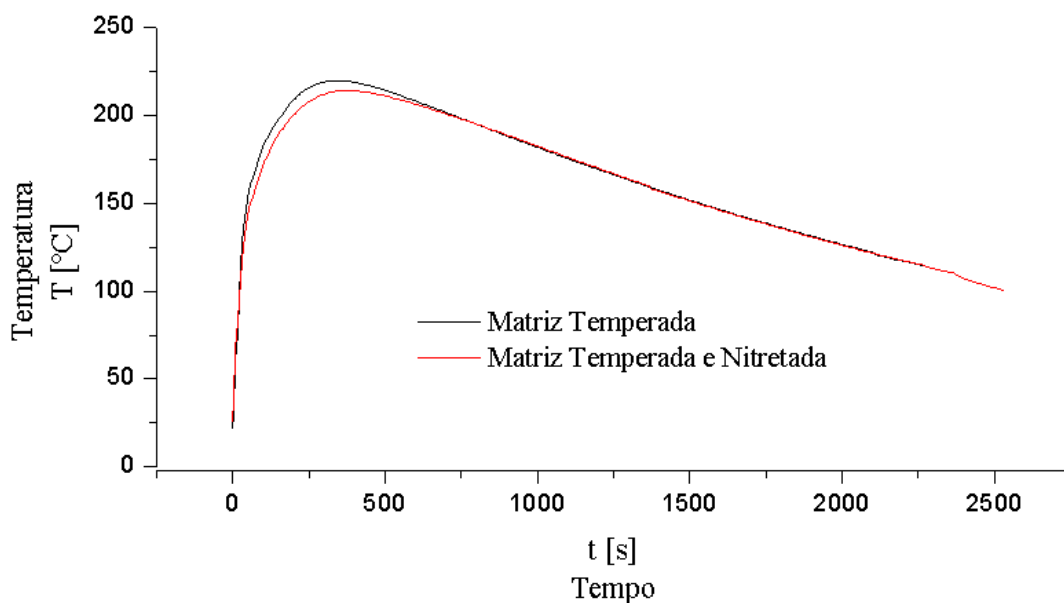


Figura 54. Comparativo das temperaturas na matriz no ponto M01.

Na Figura 54 é observado que a aplicação do tratamento superficial de nitretação possui pouca influência no perfil térmico amortecido. Porém, deve-se salientar que para os experimentos de transferência de calor pelo tempo de contato, não foi avaliada a influência de diferentes pressões de contato no perfil térmico dos corpos em contato. Outro quesito a considerar é que as maiores diferenças nos perfis térmicos dos testes realizados foram observadas entre o intervalo de 30 a 500 segundos de contato.

Um comparativo para todos os experimentos executados é apresentado na Figura 55. Os valores de temperatura expostos são apenas para o ponto M01 das matrizes sem tratamento superficial de nitretação.

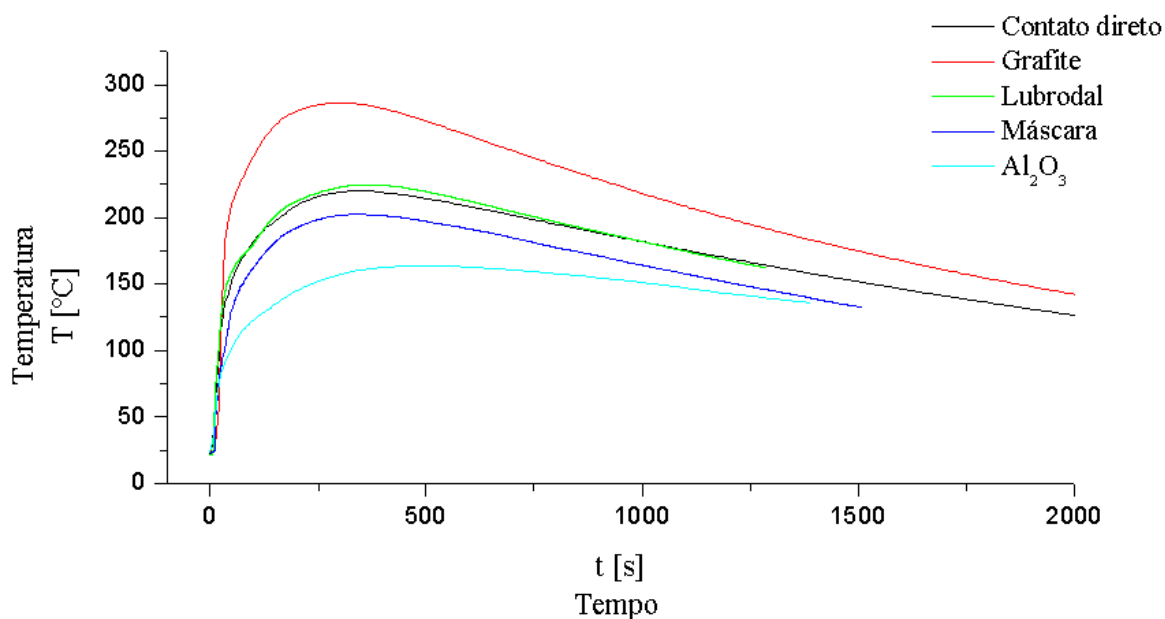


Figura 55. Comparativo térmico nos testes realizados para a superfície das matrizes para o ponto M01.

É possível observar na Figura 55 as diferenças no perfil térmico para todos os experimentos realizados. Salienta-se a elevada temperatura atingida no experimento com o uso de grafite como meio interfacial. Isto demonstra que este material possui impacto significativo favorecendo a transferência de calor da geratriz para a matriz de forjamento. Para este caso, ao longo de todo o processo a temperatura manteve-se superior aos outros meios intersticiais avaliados atingindo um valor máximo de 294°C.

No experimento com o uso do lubrificante grafitado Lubrodal verificou-se que o perfil térmico atingido no experimento se assemelhou ao perfil térmico no caso do contato direto.

Como esperado, o experimento com o uso de meio interfacial o Al₂O₃ apresentou o menor perfil térmico dentre os experimentos realizados. Para este caso, uma temperatura máxima registrada no ponto M01 foi inferior a 160°C.

No experimento com o uso de máscara metálica, foi observado uma redução no perfil térmico sobre a matriz inferior demonstrando seu papel protetivo sobre as matrizes de forjamento, atenuando a carga térmica sobre as matrizes.

4.1.2 Teste experimental de forjamento a quente

Durante a execução dos experimentos, os termopares registraram os valores de temperatura na amostra e na matriz nos respectivos pontos de medição ao longo do tempo. A célula de carga também registrou os valores de força aplicada ao longo do tempo.

O intervalo registrado representa o processo desde o transporte da geratriz até a prensa e posterior aplicação da força pela ferramenta. Um exemplo do histórico de temperatura do experimento é mostrado na Figura 56.

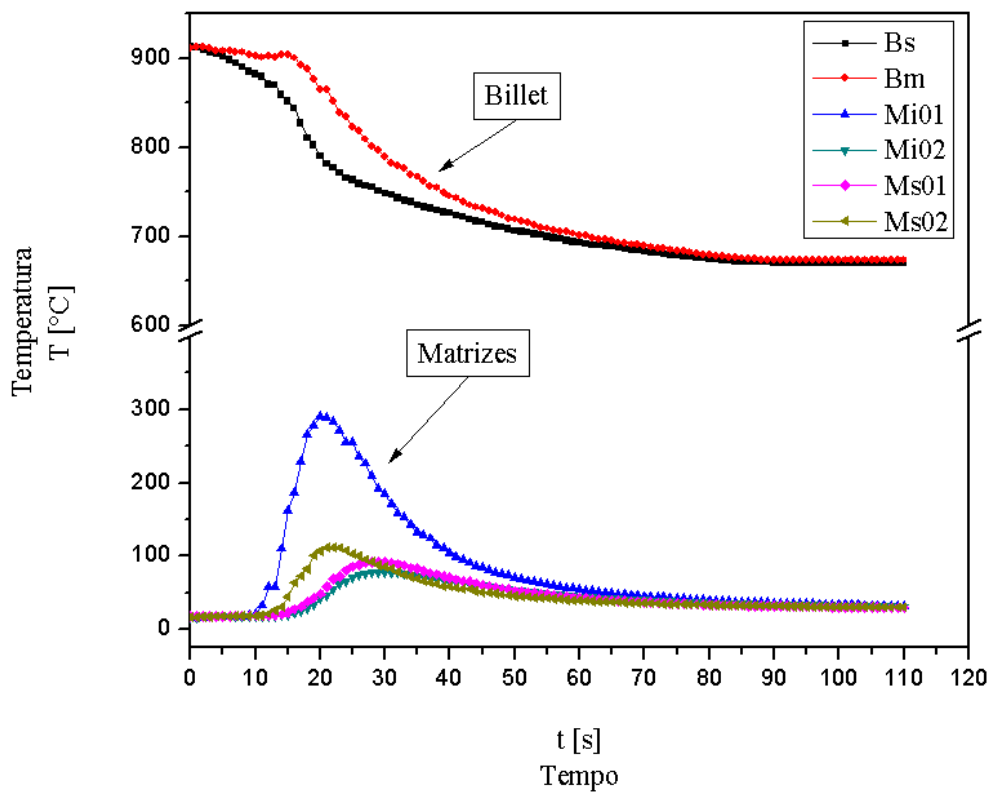


Figura 56. Histórico de temperatura registrado durante a execução dos testes experimentais.

A Figura 56 apresenta o histórico de temperatura registrado durante o teste de forjamento para o caso do forjamento sem máscara metálica. Já, a Figura 57 apresenta em detalhe o histórico de temperatura registrada somente para a geratriz durante a execução destes experimentos.

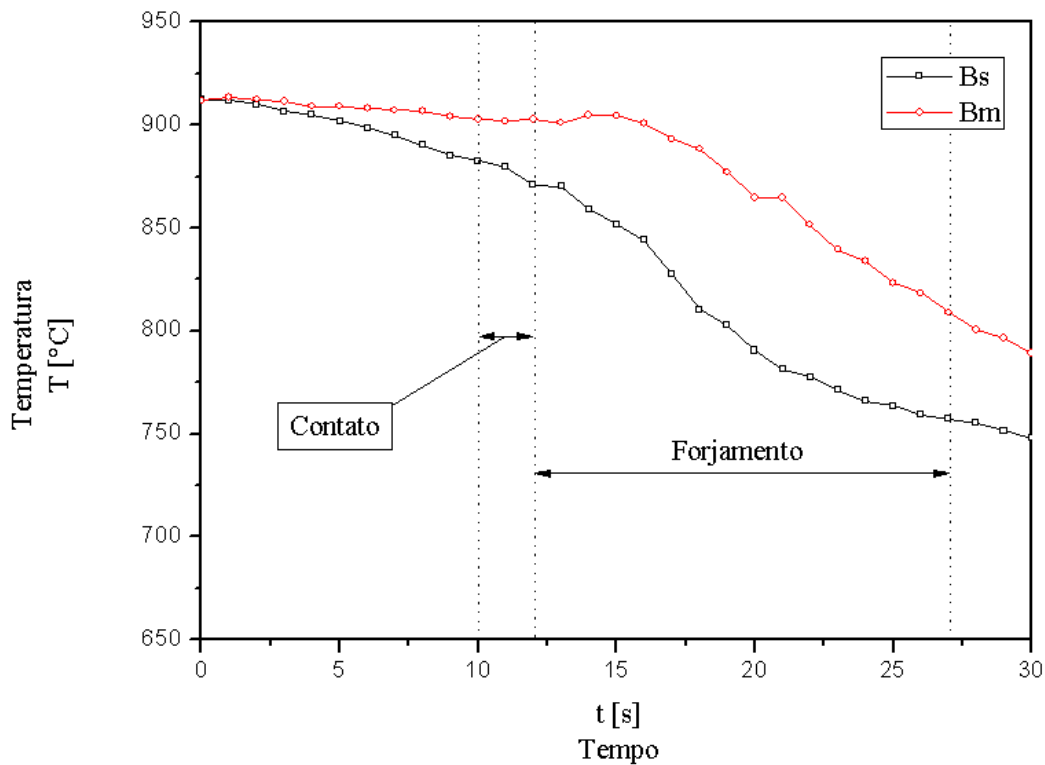


Figura 57. Histórico de temperatura na geratriz durante o teste de forjamento sem o uso de máscara metálica.

A Figura 57 constata que a temperatura nos experimentos de forjamento para o caso sem o uso de máscaras iniciou no valor de 911 °C. Ao longo dos intervalos de transporte, contato e forjamento. A temperatura da amostra cai gradativamente sendo esta queda mais acentuada durante o forjamento. Ao final do forjamento a amostra atinge uma temperatura de 789 °C.

É observado, conforme Figura 57, que a temperatura na região inferior do corpo da amostra cai mais acentuadamente do que no interior do corpo da amostra. O termopar inferior é mais próximo da superfície de contato com a matriz quando comparado ao termopar superior, situado na metade da altura da amostra. A temperatura no meio da amostra diminui continuamente do forno até o início da deformação da geratriz, possuindo um pequeno aumento da temperatura. Após, novamente há uma redução contínua da temperatura até o final da deformação. No entanto, a temperatura na parte inferior do corpo da amostra inicialmente diminuí acentuadamente e depois de um pequeno atraso resfria novamente.

De modo a facilitar a interpretação, o número de canais de aquisição de temperatura nos experimentos foi limitado ao monitoramento das temperaturas nos pontos mais próximos a

superfície das matrizes. No caso do experimento de forjamento sem o uso de máscaras metálicas foram apenas monitoradas as temperaturas nos pontos Mi01 e Mi02 para a matriz inferior, e Ms01 e Ms02 para a matriz superior. As localizações destes pontos são ilustradas na Figura 39. Conforme Figura 58, o termopar com o perfil de temperatura Mi01 possui a menor distância para a superfície da matriz. Desta maneira, e conforme esperado, é possível constatar que a temperatura na superfície da matriz aumenta acentuadamente durante o processo de forjamento.

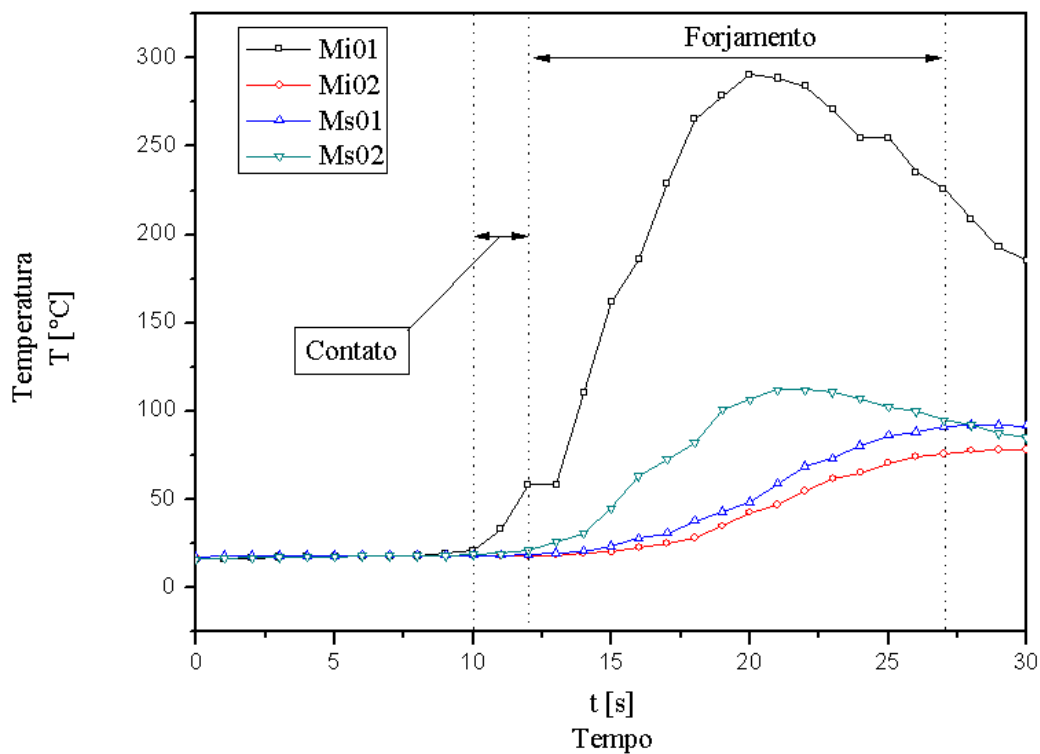


Figura 58. Perfil de temperatura monitorada para a geratriz no experimento de forjamento sem o uso de máscaras metálicas.

O termopar Mi01, cujo ponto de medição está localizado a uma distância de 2mm da superfície, sofre uma alteração de temperatura de 17°C para 290°C. À medida que a distância do ponto de medição da superfície da matriz aumenta, o gradiente de temperatura diminui. O termopar Mi02, que está posicionado a uma distância de aproximadamente 10,2mm da superfície, sofre um aumento de temperatura inferior a 45°C, valor significativamente menor quando comprado ao termopar Mi01. Portanto, a amplitude térmica nas áreas próximas da

superfície é de 270°C. À medida que se afasta da superfície da matriz, os valores de amplitude térmica decaem gradativamente.

Nos experimentos que utilizam uma camada protetora de chapa metálica, a temperatura é medida através do termopar Masc conforme previamente apresentado na Figura 38. O histórico da temperatura registrada durante o experimento com o uso de máscara metálica é apresentado na Figura 59. Nesta figura, os valores do termopar Masc são representados pela legenda Máscara.

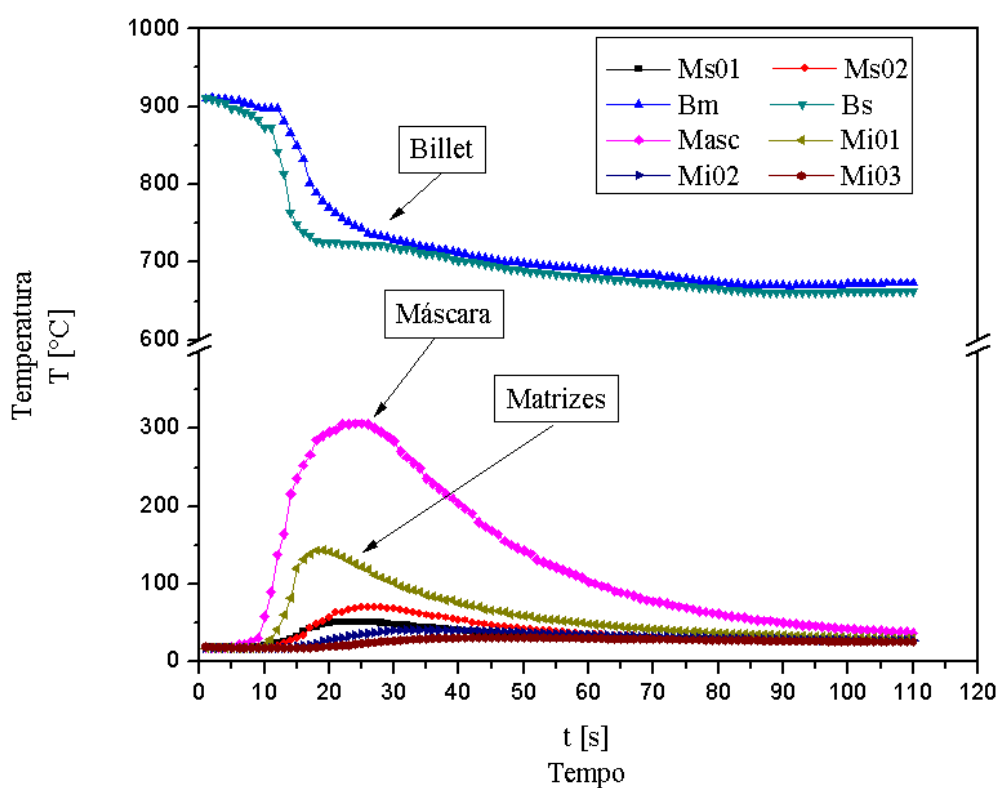


Figura 59. Histórico de temperatura registrado no teste de forjamento com máscaras metálicas.

O perfil de temperatura na geratriz registrado no teste com o uso de máscaras metálicas é apresentado na Figura 60. O perfil medido apresenta uma queda mais acentuada quando comparada com o teste sem o uso de máscaras metálicas, atingindo no final do forjamento uma temperatura de 725°C no ponto Bs, ponto mais próximo a superfície da matriz.

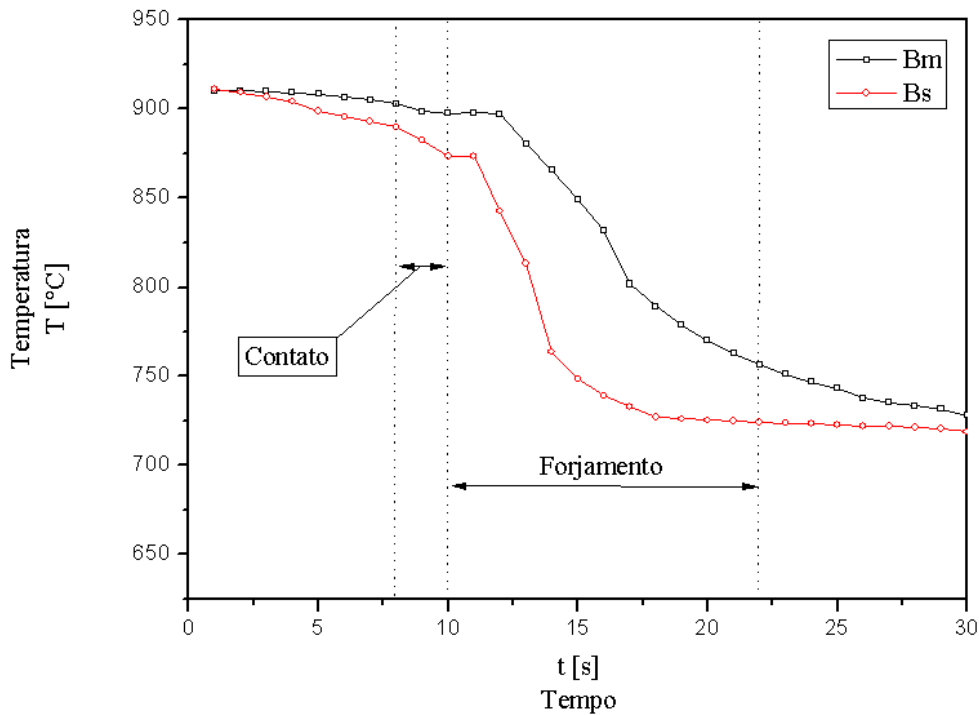


Figura 60. Histórico da temperatura na geratriz durante o teste de forjamento com o uso de máscaras metálicas.

Os valores de temperatura registrados durante o teste com o uso de máscara metálica são apresentados na Figura 61. O perfil de temperatura registrado no experimento de forjamento com o uso de máscaras apresentou valores de temperaturas inferiores às temperaturas atingidas durante o experimento sem o uso de máscaras metálicas. A temperatura registrada na máscara sofre um aumento de 18°C para 284°C durante o processo. As medições mostram que mesmo após o fim da conformação da geratriz, ocorre um aumento na temperatura da máscara metálica. Este aumento é atribuído ao atraso na retirada da geratriz ainda quente, a qual permanece em contato com a máscara efetuando trocas de calor. A temperatura da máscara durante o contato com a geratriz aquecido sofre um aumento de 18°C para 58°C em 2s. A Figura 61 mostra também que a temperatura no ponto Mi01 localizada a 2mm da superfície atinge uma temperatura de 142°C no final do forjamento e temperaturas inferiores a 40°C nos pontos Mi02 e Mi03 ao final do forjamento.

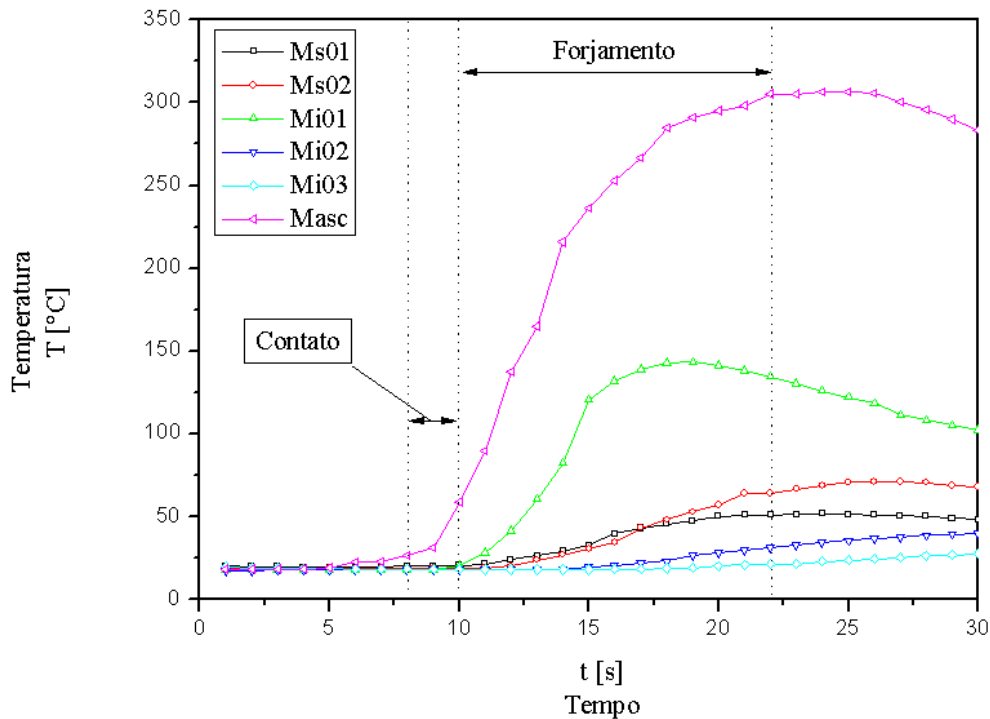


Figura 61. Histórico de temperatura registrado nas matrizes e máscara durante o teste de forjamento com o uso de máscaras metálicas.

Na Figura 62 são apresentados os históricos de temperatura dos testes de forjamento com e sem o uso de máscaras metálicas. É importante observar que as temperaturas nos pontos Mi01 e Mi02, para os testes de forjamento com e sem o uso de máscaras metálicas, atingiram valores máximos de 291°C e 78°C respectivamente. No caso dos experimentos com o uso de máscara metálica a temperatura nos pontos alcança valores de 142°C e 41°C, resultando em uma diferença de cerca de 150°C para o ponto Mi01, e de 37°C para o ponto Mi02. Esta redução ocorre devido a influência das matrizes na transferência de calor dos corpos em contato. O uso da máscara impõe uma resistência a transferência de calor entre a geratriz e matriz dificultando este fenômeno. Assim, a temperatura nos pontos Mi01 e Mi02 atingem valores inferiores aos valores alcançados nos experimentos sem o uso de máscaras de proteção.

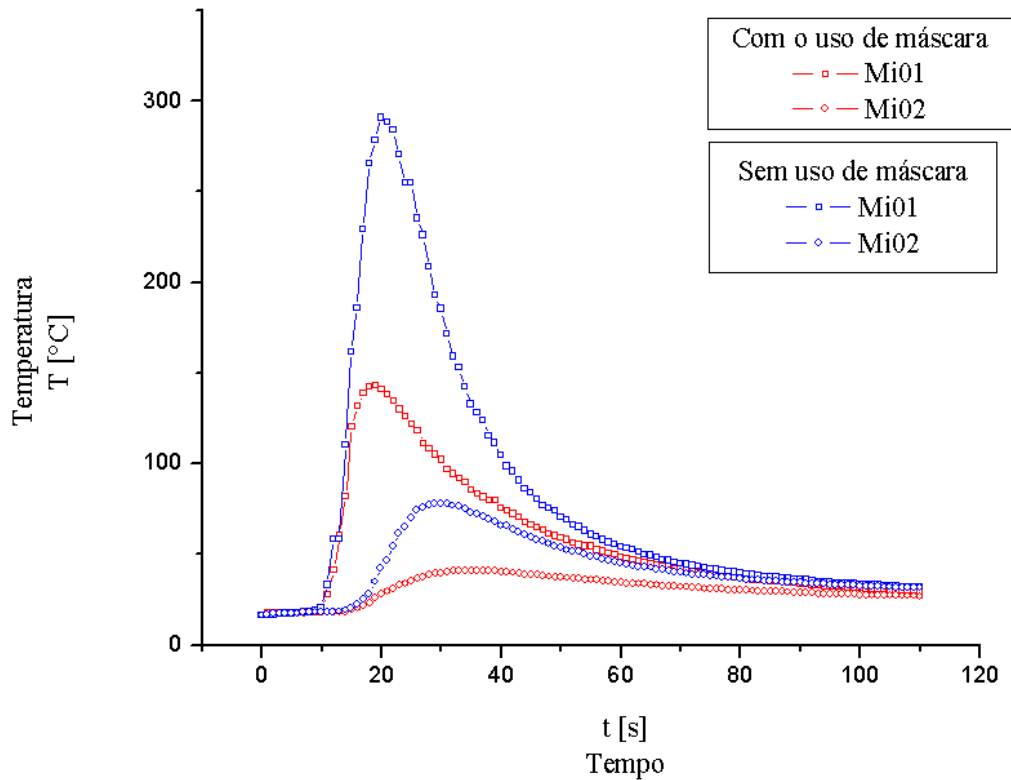


Figura 62. Temperatura nos pontos Mi01 e Mi02 da matriz inferior durante testes com e sem o uso de máscaras.

4.2 MODELOS NUMÉRICOS

Os modelos numéricos utilizados possuem a finalidade de representar os modelos experimentais e também têm como objetivo determinar o IHTC dos modelos experimentais realizados. Estes modelos são apresentados nas seções seguintes:

4.2.1 Análise inversa do teste de transferência de calor pelo tempo de contato.

Transferência de calor por contato direto:

Um modelo numérico foi criado e alimentado com os dados provenientes dos experimentos de transferência de calor pelo tempo de contato. Para isso foram utilizados os valores de temperatura registrados no ponto B01, M01 e para o caso com máscara o ponto MS01. O objetivo geral era atingir valores de temperatura no modelo numérico os mais

próximos possíveis dos valores do modelo físico. Como estratégia, foi proposto à adequação do coeficiente de transferência de calor para atingir os valores de temperatura nos pontos.

Devido ao escopo deste trabalho ser a análise térmica do processo de forjamento com e sem o uso de máscaras metálicas foi realizada apenas a análise para os casos de transferência de calor pelo tempo de contato para o caso de contato direto e o caso com uso de máscaras metálicas como meio interfacial. No modelo para o caso de contato direto as temperaturas experimentais e simuladas são apresentadas na Figura 63.

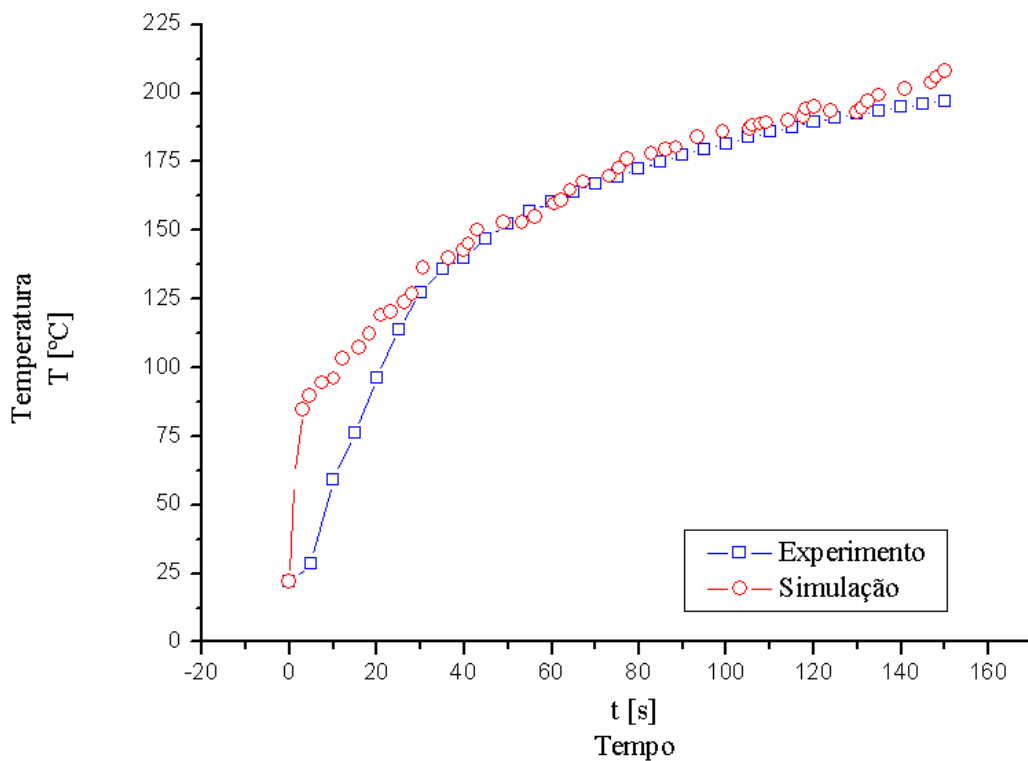


Figura 63. Valores de temperatura no ponto M01.

A Figura 63 demonstra que os valores de temperatura do modelo numérico mantiveram certa aproximação aos valores experimentais, fato que indica uma boa aproximação do modelo inverso aos experimentos. No intervalo inicial, existe uma discrepância entre os valores devido ao modelo numérico não considerar a influência da camada oxidada na superfície da geratriz. Porém, é importante ressaltar que os valores migraram para a convergência sendo está atingida aos 25s e mantendo-se até o fim do experimento. Ao final do experimento, uma diferença entre simulação e experimento de 11°C foi registrada.

O histórico térmico do ponto B01 na geratriz, registrado durante o experimento sem o uso de máscaras, foi comparado com o valor resultante do modelo numérico para o mesmo caso. A Figura 64 apresenta os valores de temperatura no ponto B01 para experimentos e simulação numérica.

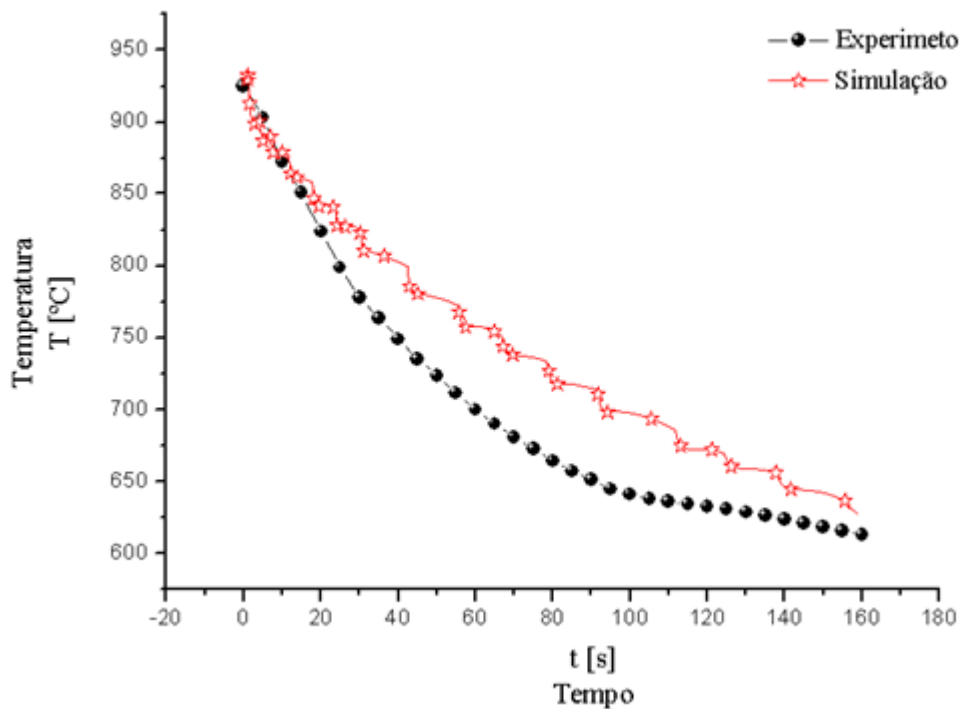


Figura 64. Temperatura no ponto B01, no teste de transferência de calor sem o uso de máscaras.

Analisando a Figura 64, constata-se que a temperatura do modelo numérico apresentou discrepâncias aos valores de temperatura do experimento. A maior variação ocorreu aos 100s com 43°C de diferença entre os valores. No entanto, o histórico de temperatura do modelo numérico possui certa conformidade ao comportamento da temperatura obtido nos experimentos.

Com a análise dos valores obtidos do modelo numérico e sua comparação aos valores experimentais é possível concluir que o modelo inverso apresentou boa conformidade. Assim, os valores dos coeficientes de transferência de calor obtidos pelo modelo numérico podem ser tidos como válidos ao modelo experimental. Os valores obtidos pelo modelo numérico inverso para os coeficientes de transferência de calor para o caso de contato direto são apresentados na

Figura 65. Estes valores são apenas válidos para o modelo proposto nesta dissertação onde a transferência de calor ocorre entre corpos em contato sem a aplicação de pressão.

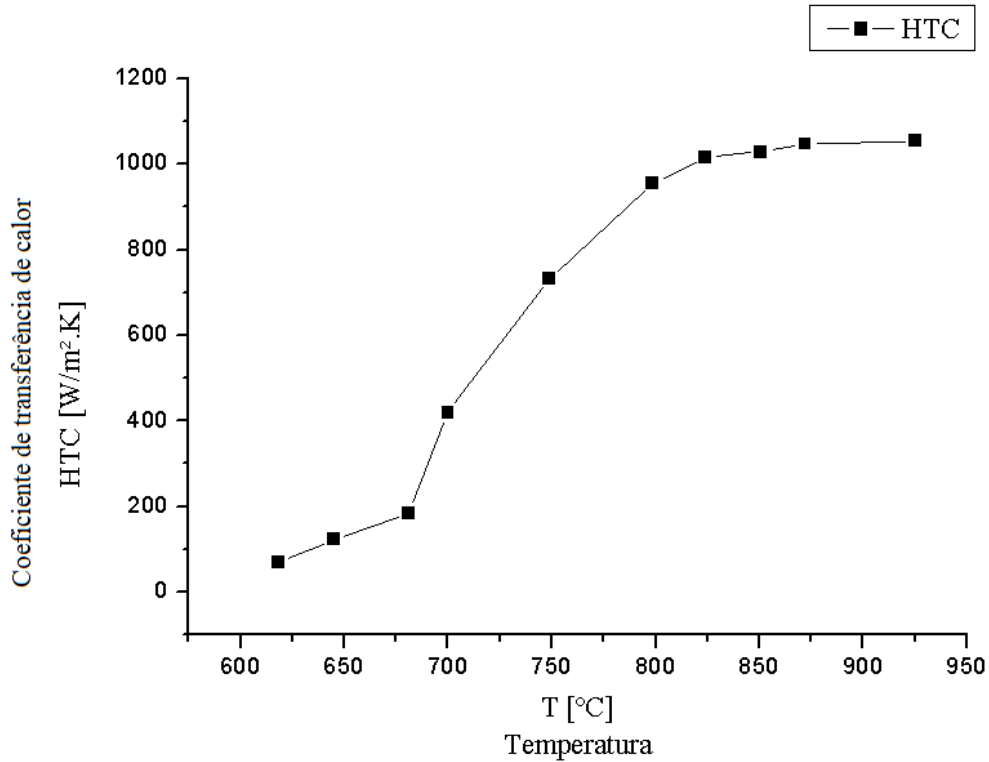


Figura 65. Valores do HTC obtidos pelo modelo inverso em função da temperatura da geratriz.

Na Figura 65 são plotados os valores do coeficiente de transferência de calor para o modelo de transferência de calor sem o uso de máscara como meio interfacial. Os valores apresentados estão relacionados com a temperatura da geratriz.

No início do teste devido à grande diferença entre as temperaturas nas interfaces dos materiais em contato o fluxo de calor entre geratriz e matriz também é elevado, ocasionado em valores para o HTC altos, no caso entre 1000 e 1060 W/m²K. Assim, conforme se executa o teste, a diferença na temperatura na interface dos materiais em contato é reduzida assim como o fluxo de calor. Isto provoca uma redução no valor do HTC fazendo com que este atinja no final do experimento o valor de 68 W/m²K.

Transferência de calor com o uso de máscaras:

No teste de transferência de calor com o uso de máscaras metálicas os valores de temperatura na matriz para o ponto M01 são plotados na Figura 66. Ao comparar os valores de

temperatura do modelo numérico com os valores de temperatura do modelo físico é verificada uma diferença máxima de 16°C aos 100s de teste.

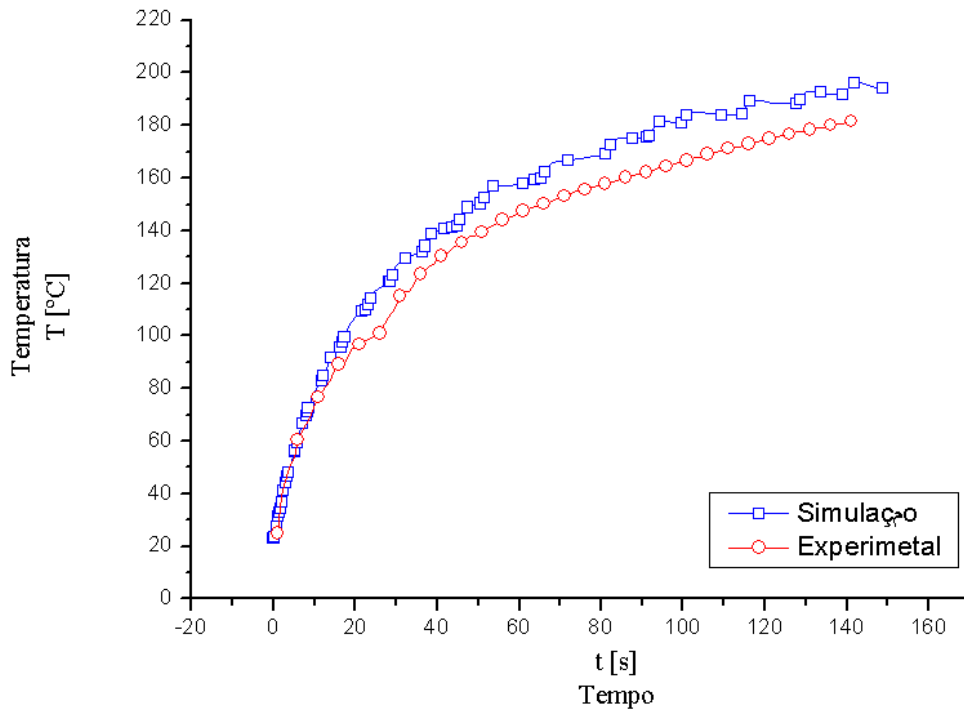


Figura 66. Valores de temperatura no ponto M01 para o teste com o uso de máscaras.

A temperatura na geratriz para o ponto B01 é apresentada na Figura 67. Os valores entre experimentos e simulação apresentaram uma diferença máxima de 62°C aos 24 segundos de teste. Realizando uma comparação entre os valores de todo o perfil de temperatura, nos 71 primeiros segundos há uma diferença considerável em torno de 43°C a qual é reduzida nos segundos seguintes. Apesar da diferença dos valores experimentais e simulados, os valores provenientes do modelo inverso possuíram um comportamento semelhante aos experimentos.

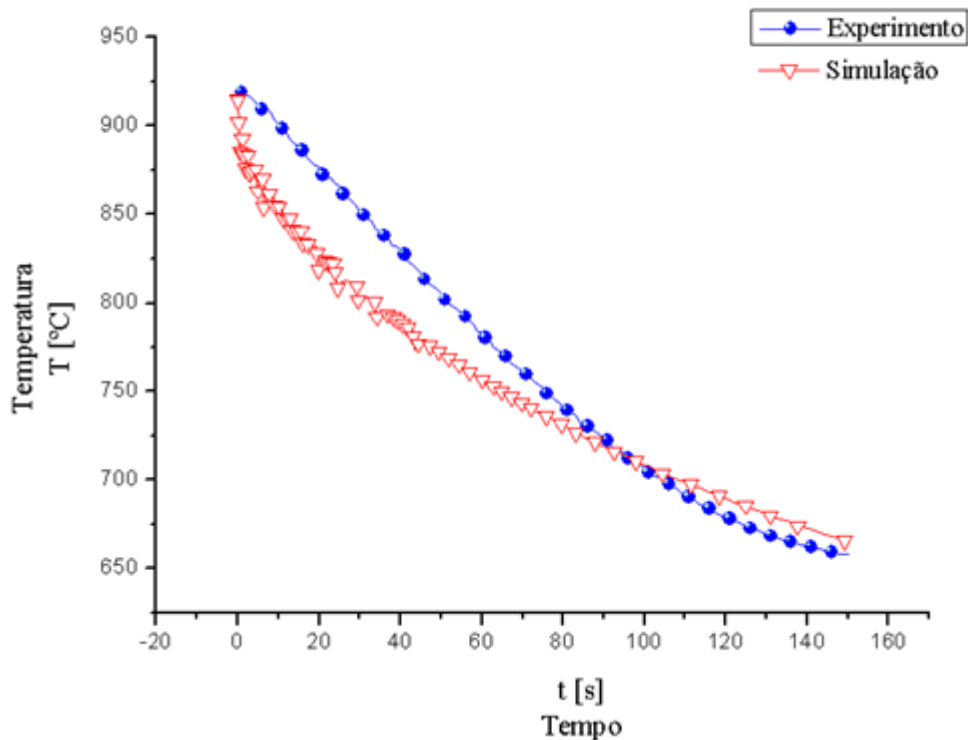


Figura 67. Temperatura no ponto B01 da geratriz, no teste de transferência de calor com uso de máscaras.

A temperatura no ponto MS01 para o modelo numérico foi monitorada e seus valores de temperatura foram comparados com os valores experimentais registrados. A Figura 68 apresenta esta comparação.

Os valores obtidos pelo modelo inverso apresentaram boa aproximação aos valores experimentais, possuindo uma diferença máxima de 170°C nos instantes iniciais e permanecendo com uma maior diferença até os 13 segundos de teste. Posteriormente, a partir dos 13 segundos, a diferença entre os valores torna-se menor até o final do teste.

O coeficiente de transferência de calor entre geratriz/máscara obtido pelo modelo inverso para o caso de forjamento com o uso de máscaras metálicas é apresentado na Figura 69. Entretanto, devido às limitações do software para o contato entre dois objetos definidos como matrizes com condução de calor, o valor do coeficiente de transferência de calor entre a máscara/matriz deve possuir um valor constante. Assim, no modelo inverso, o valor para o HTC entre máscara e matriz calculado pelo modelo inverso foi de 3500W/m²·K.

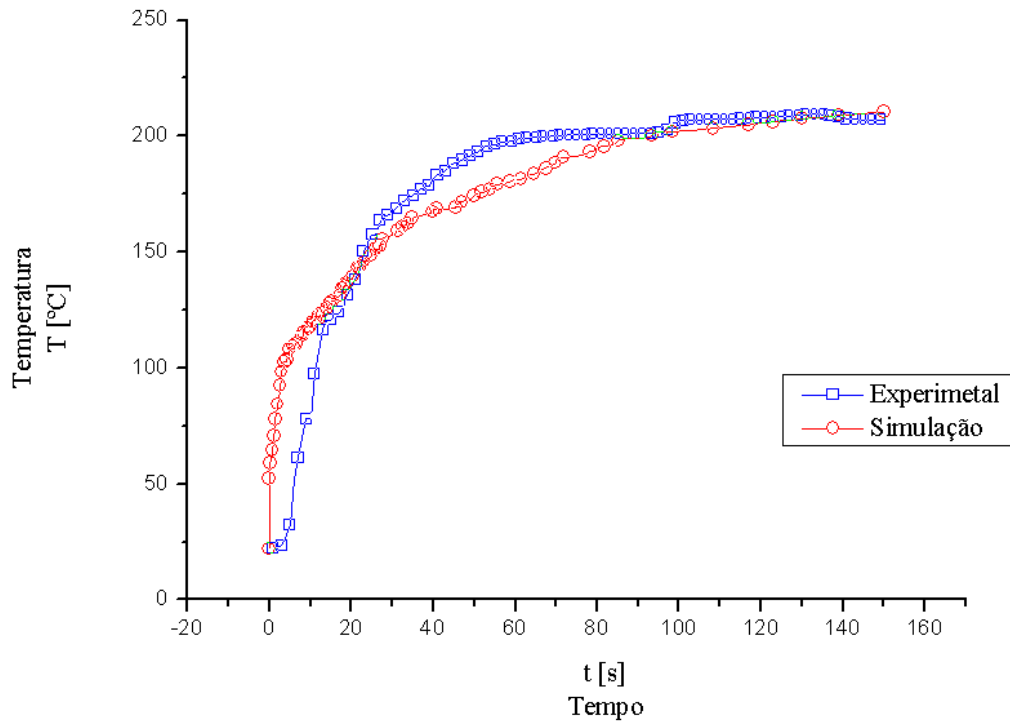


Figura 68. Temperatura no ponto MS01 na máscara.

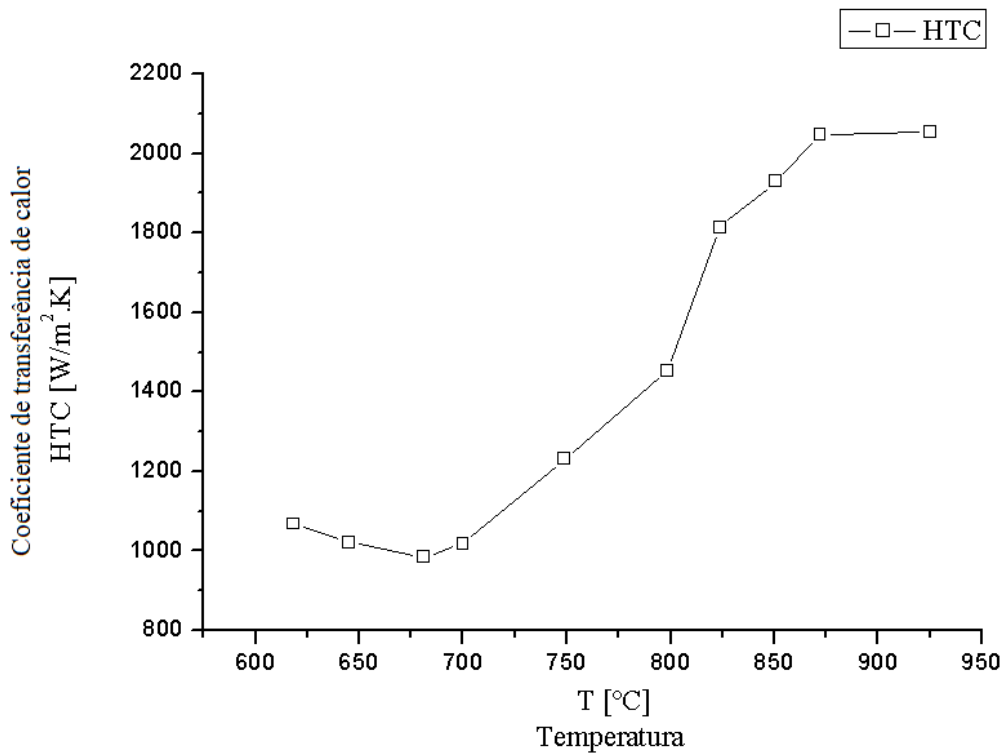


Figura 69. Coeficiente de transferência de calor entre geratriz /máscara

4.2.2 Modelo inverso do processo de forjamento a quente em matriz aberta

Forjamento sem o uso de máscaras:

Para a análise do processo de forjamento sem o uso de máscaras, foram considerados como valores iniciais para o modelo inverso os valores do coeficiente de transferência de calor pelo tempo de contato. No modelo para o processo de forjamento sem máscaras, os valores de temperatura, tanto para experimentos como para análise numérica, são apresentados nas Figuras 70 e 71.

Os valores do modelo numérico apresentaram boa aproximação aos valores experimentais, possuindo uma pequena diferença ao valor máximo registrado no ponto Mi01, conforme Figura 70. Porém, conforme demonstrado pela Figura 71, esta diferença não compromete a confiabilidade do modelo numérico, pois este apresenta boa aproximação os valores nos pontos Bm, Bs e Mi02.

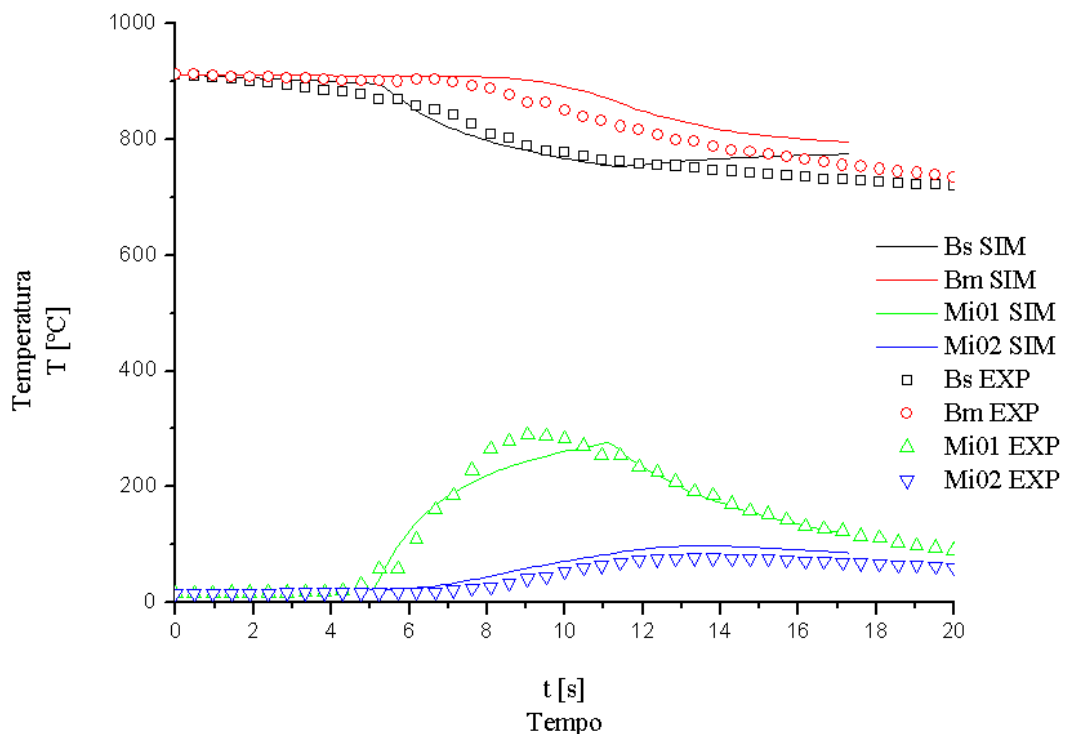


Figura 70. Comparação entre os valores de temperatura obtidos pelo modelo inverso.

Na Figura 71 é apresentado, em detalhe, uma comparação entre os valores experimentais e simulados obtidos através do modelo inverso. Os valores nos pontos Mi01 apresentaram uma diferença de 12 °C no ponto máximo.

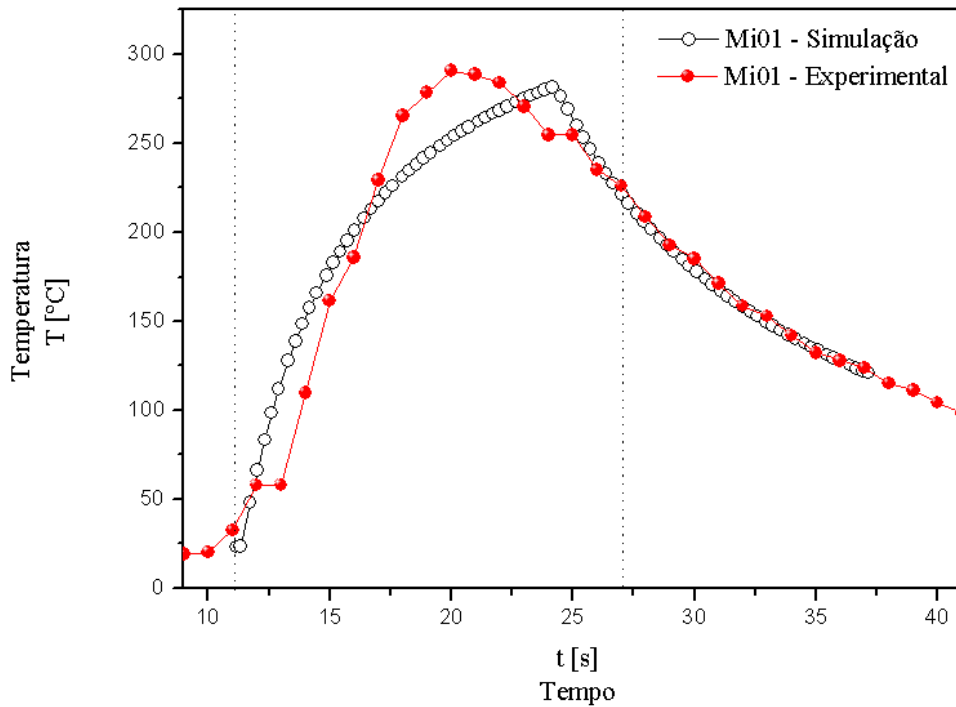


Figura 71. Valores de temperatura do modelo inverso e experimental para o ponto Mi01.

O valor do coeficiente de transferência de calor obtido pelo modelo inverso para o caso de forjamento sem o uso de máscaras metálicas é apresentado na Figura 72. Os valores do HTC obtidos pelo modelo para o forjamento sem máscaras apresentaram valores superiores aos valores obtidos pelo teste pelo tempo de contato. Este comportamento é admissível, pois a aplicação de pressão nas superfícies em contato influencia diretamente sobre os valores do HTC, provocando um aumento nestes valores.

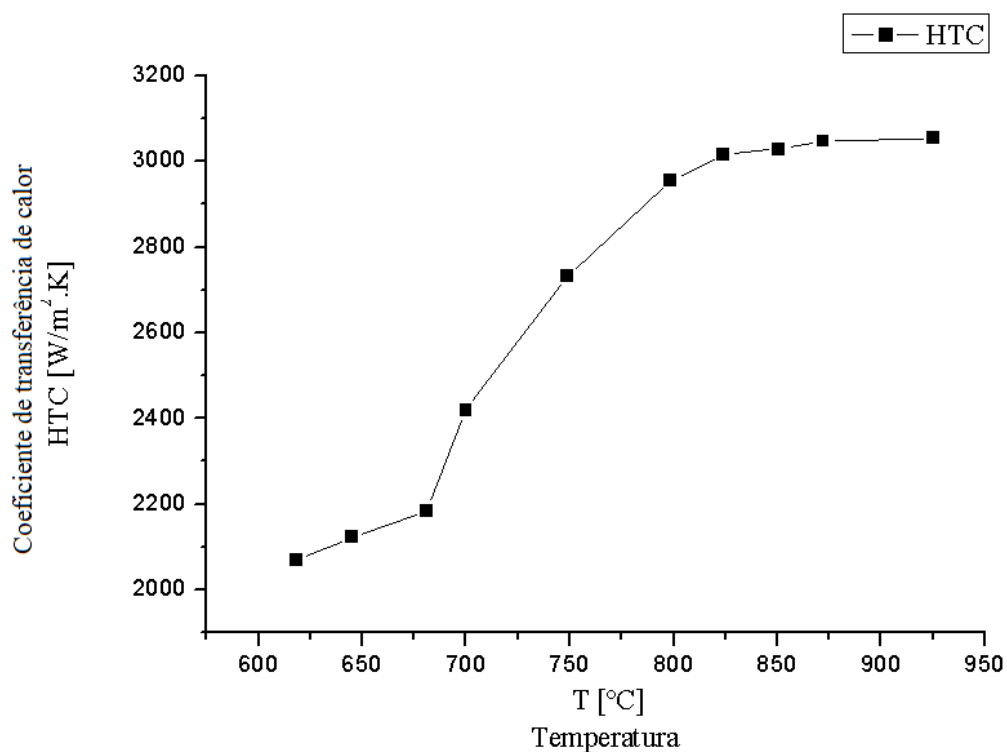


Figura 72. Valor obtido pelo modelo inverso para o coeficiente de transferência de calor para o forjamento sem máscara entre a matriz e geratriz.

O valor obtido pelo modelo inverso para o forjamento sem máscara apresentou como esperado valores superiores aos valores obtidos pelo modelo para a transferência de calor pelo tempo de contato. Isto ocorre, pois como previamente descrito, o HTC tende a apresentar maiores valores para maiores pressões de contato.

Forjamento com o uso de máscaras metálicas:

Os valores de temperatura obtidos pelo modelo inverso para o forjamento com o uso de máscaras são apresentados na Figura 73. Os valores registrados para a temperatura apresentaram um desvio maior nas temperaturas na geratriz, ponto Bm e Bs. Este comportamento pode ser atribuído a maior dificuldade em modelar a transferência de calor entre matriz e máscara no software. Porém, é importante ressaltar que os valores nos pontos, Masc, Mi01 e Mi02 possuíram boa aproximação aos valores experimentais.

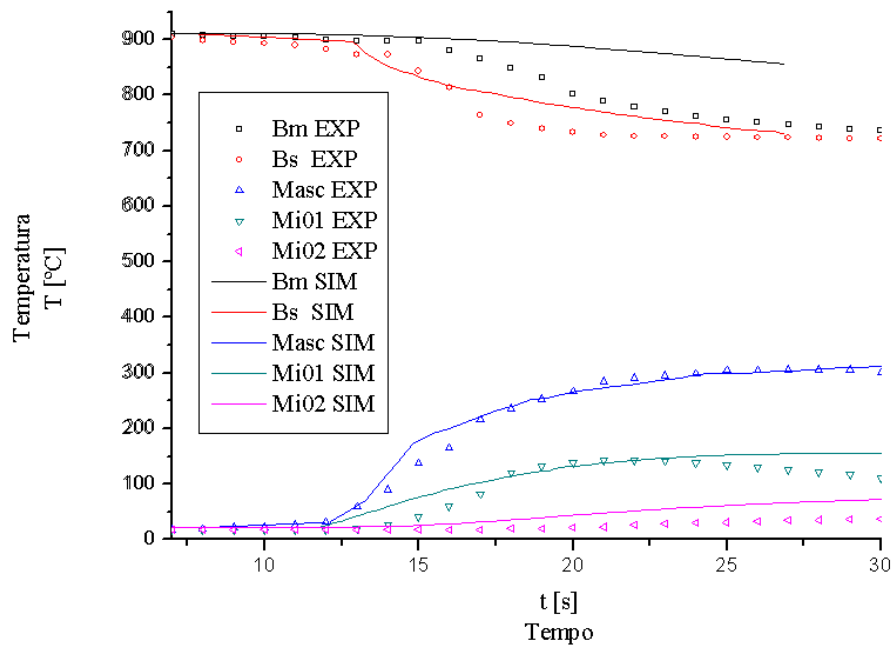


Figura 73. Comparação entre os valores experimentais e simulacionais obtidos para o caso do forjamento com o uso de máscaras metálicas.

Na Figura 74 é apresentado em detalhe as temperaturas nos pontos Masc e Mi01 para os valores experimentais e simulados. Aqui, o comportamento da curva de temperatura apresentou um formato diferente ao da curva de temperatura na Figura 71. Esta diferença na forma é devido à adesão da máscara na geratriz aquecida que ocorreu no experimento de forjamento com máscaras metálicas. Esta adesão implica na manutenção de temperaturas mais elevadas na máscara metálica.

Os valores do coeficiente de transferência de calor entre a matriz e geratriz são apresentados na Figura 75. Os valores do HTC definidos pelo modelo inverso para a transferência de calor entre geratriz/matriz apresentaram valores superiores aos valores resultantes do experimento em função do tempo de contato, possuindo um valor médio de $133000\text{W/m}^2\cdot\text{K}$.

Como previamente descrito, devido às limitações do software para o contato entre dois objetos definidos como matrizes com condução de calor, o valor do coeficiente de transferência de calor entre a máscara/matriz deve possuir um valor constante. Assim, no modelo inverso, o valor para o HTC para o processo de forjamento entre máscara e matriz calculado pelo modelo inverso foi de $3700\text{W/m}^2\cdot\text{K}$.

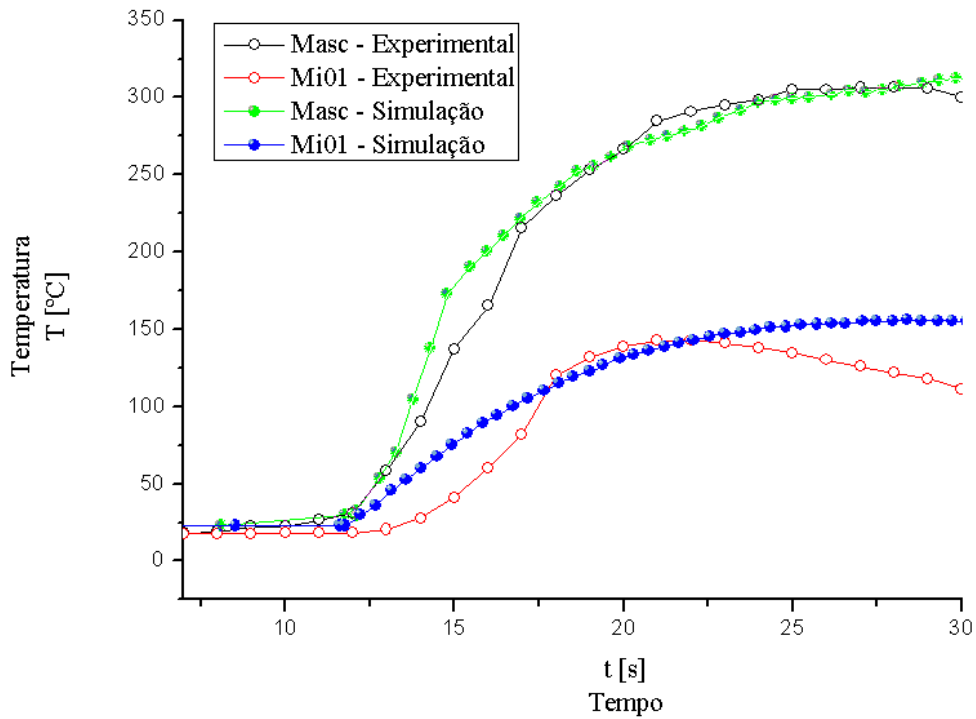


Figura 74. Valores de temperatura para o ponto Masc e Mi01.

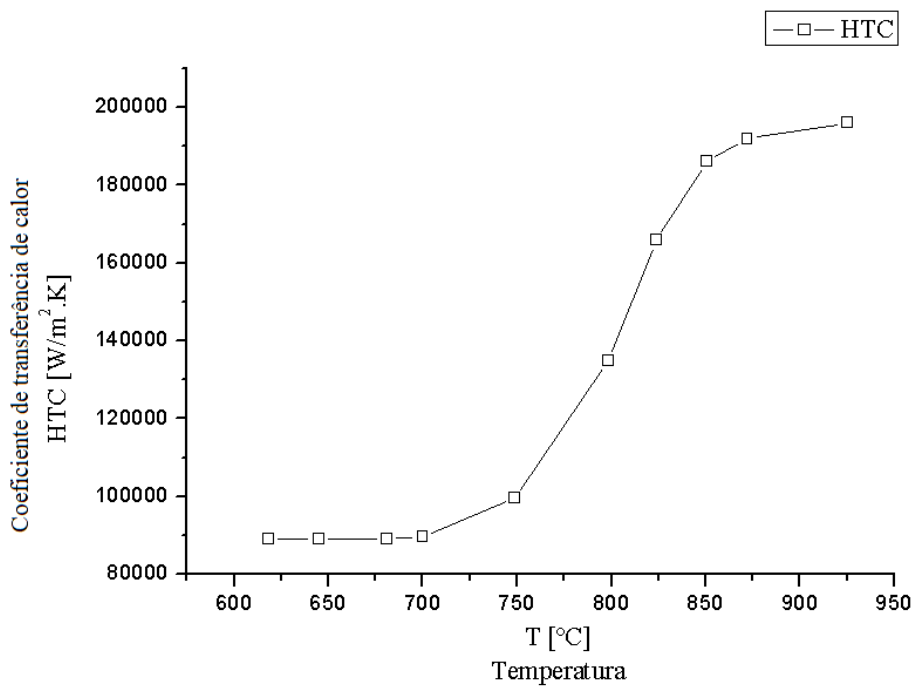


Figura 75. Valor obtido pelo modelo inverso para o HTC entre geratriz e máscara.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos valores provenientes dos experimentos e do modelo inverso, é então realizada uma discussão dos resultados buscando analisar os valores obtidos nos testes de transferência de calor pelo tempo de contato e nos experimentos de forjamento.

5.1 TESTES EXPERIMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELO TEMPO DE CONTATO

Análise da transferência de calor com o uso de máscaras: Modelo experimental

Com temperatura inicial de 950°C, a geratriz possui uma diferença na temperatura de 927°C comparado a temperatura da matriz de 23°C. Durante o transporte do forno para a prensa, a peça de trabalho diminui aproximadamente 18°C de sua temperatura inicial e resfria a uma temperatura média de 932°C. Esta queda da temperatura na geratriz depende da duração do transporte. O resfriamento é devido à radiação e convecção da peça para o ambiente, que tem uma temperatura média de 23°C.

Assim que a peça de trabalho é posicionada sobre a superfície da matriz e os dois corpos estão em contato, uma primeira troca de calor ocorre através da superfície de contato. Nos pontos de picos de rugosidade, onde o contato entre os materiais ocorre, há condução de calor entre os materiais. Ao aquecer da peça de trabalho em um forno sem atmosfera controlada, uma camada de óxido é formada, a qual não pode ser completamente removida da superfície da peça com facilidade. Visando a simplificação do modelo numérico, a espessura desta camada de óxido na superfície da geratriz e sua influência não foram consideradas neste trabalho.

Devido ao contato e à troca de calor entre a geratriz e a matriz, a temperatura da geratriz decresce, pois, calor é transmitido para o corpo em contato, o qual aumenta sua temperatura. Um dos princípios da transferência de calor entre corpos é que estes visam atingir o equilíbrio térmico na superfície de contato, através da transferência de calor do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura. Sem aplicação de pressão a transmissão de calor ocorre somente pelo contato. A influência das perdas por radiação é relativamente pequena e não foi considerada neste estudo.

Nos experimentos com matrizes temperadas e com tratamento superficial de nitretação, o perfil térmico registrado no teste de transferência de calor foi muito próximo do perfil térmico dos experimentos, conforme apresentado na Figura 53. Verificou-se uma diferença de 4°C entre

as temperaturas máximas registradas. Assim, foi determinado que para os testes seguintes fossem utilizadas apenas as matrizes temperadas e sem o tratamento superficial de nitretação.

Nos experimentos com o uso de meios interfaciais, apresentados na Figura 54, foram utilizados meios lubrificantes específicos para o forjamento a quente como o grafite em pó e o lubrificante comercial *LUBRODAL*. Os perfis de temperatura dos experimentos com grafite em pó apresentaram valores superiores a 286,27°C no ponto M01, o qual está a 2,00 milímetros da superfície da matriz. Estes valores são superiores a todos os experimentos realizados. Quando se compara estes valores de temperatura máxima com o experimento de contato direto, a variação máxima em ambos os testes foi de aproximadamente 66°C. Se analisarmos os valores registrados no teste com o uso do lubrificante *LUBRODAL*, o perfil de temperatura apresentou uma semelhança aos valores registrados no teste com contato direto com uma diferença de 4°C nos valores máximos. Sendo um lubrificante grafitado e solúvel em água, no momento do contato com a geratriz a evaporação da água resulta em uma redução rápida na temperatura na superfície, o que conseqüentemente conduz a uma redução na carga térmica na superfície em contato.

No experimento onde óxido de alumínio (Al_2O_3) foi utilizado como meio interfacial, o perfil térmico nos testes foi o menor entre todos os experimentos, atingindo um valor máximo de 163,65°C. Este comportamento é atribuído a característica isolante do material. Ressalta-se que o experimento com Al_2O_3 foi realizado apenas com o propósito de comparar os valores obtidos experimentalmente.

Nos experimentos com o uso de máscaras de aço 22MnB5, conforme apresentado na Figura 52, conclui-se que quando ocorre o contato entre geratriz e máscara, a temperatura da máscara sofre um aumento rápido. A temperatura medida atinge o valor de 208,8°C aos 132 segundos no ponto MS01 e mantém-se 40°C superior a temperatura no ponto M01 localizado na superfície da matriz durante os 50 primeiros segundos de teste. Os valores no experimento com o uso de máscaras apresentaram valores intermediários no impacto térmico sobre a matriz inferior, quando comparado com os outros experimentos executados.

Finalmente, para os experimentos com matrizes temperadas e submetidas a tratamentos superficiais, foi verificado que há uma influência pequena na temperatura monitorada no ponto M01. Entretanto, devido à diferença ser de no máximo 4°C esta pode ser desconsiderada. Novos experimentos devem ser realizados com a finalidade de analisar a influência da camada nitretada sobre a transferência de calor interfacial. Nos experimentos com meios interfaciais, foi observado que o grafite em pó favorece a transferência de calor interfacial entre os corpos

em contato, resultando em temperaturas maiores nos testes. Com uso do lubrificante industrial *LUBRODAL AT CR6*, o perfil de temperatura teve comportamento próxima ao registrado no experimento com contato direto, e uma temperatura menor que a atingida com o uso de grafite. O grafite possui como característica, além de reduzir o atrito entre os corpos em contato, também resistiu a temperaturas elevadas na matriz. No experimento realizado com o uso de Al_2O_3 como meio interfacial, a temperatura apresentou os menores valores quando comparado com os outros experimentos. Estes resultados estão de acordo com os esperados para a utilização deste material como meio interfacial. Quando se analisa o experimento com o uso de máscara de aço 22MnB5, a temperatura atingida no experimento foi menor comparada aos testes de contato direto e com o uso de lubrificantes. Portanto, quando comparado a todos os outros experimentos realizados, o uso de máscaras metálicas resultou nas menores temperaturas na superfície das matrizes durante o processo.

Processo de forjamento a quente em matriz aberta: Modelo experimental

No experimento de forjamento, a temperatura na geratriz foi monitorada por um termopar na região inferior da geratriz (Bs), localizado a apenas 3,00 milímetros a partir da superfície em contato com a matriz. Durante os testes, este termopar registrou uma diminuição de temperatura significativa assim que foi colocado em contato com a superfície da matriz. O termopar localizado na metade da altura da geratriz (Bm), também apresentou uma queda em seu valor de temperatura, porém com um atraso em relação ao tempo do início do contato e com uma queda na temperatura menos acentuada.

As temperaturas monitoradas na matriz inferior (Mi01, Mi02, Mi03 e Mi03) foram utilizadas como dados de entrada para o modelo inverso. Para os experimentos, estas foram monitoradas em posições próximas a superfície da matriz inferior, possuindo o termopar Mi01 uma distância de 2,00 milímetros a superfície da matriz.

A geratriz aquecida foi retirada do forno a uma temperatura média de 930°C. Posteriormente, ocorreu o transporte entre forno e matriz, resultando em uma redução de 13°C. O tempo de transporte influencia diretamente na redução de temperatura, a qual ocorre por radiação e convecção com o ar. A temperatura ambiente manteve-se próxima de 23 °C durante a realização dos testes.

Após o transporte, a geratriz aquecida é posicionada sobre a superfície da matriz inferior. Isto implica que a temperatura no ponto Mi01 tenha um aumento em seu valor. Devido à matriz superior estar em posição elevada, há um atraso entre o início do deslocamento e o

contato entre geratriz e matriz superior. Este atraso ocasionado pela aproximação da matriz superior a geratriz foi, usualmente, entre 3 a 4 segundos. Neste período, somente a temperatura na matriz inferior (Mi01) é modificada. Após este tempo, ocorreu o aumento da temperatura nos termopares Ms01 e Ms02, ambos localizados na matriz superior.

Com o início da deformação da geratriz pela matriz de forjamento, o fluxo de calor da geratriz para a matriz se inicia e a temperatura na matriz aumenta acentuadamente. Isso ocorre porque a aplicação de pressão deforma os picos de rugosidade, aumentando assim a área real da superfície. Como a condutividade térmica dos dois sólidos é maior que a do ar, a condução de calor aumenta à medida que a área de contato aumenta. Como resultado, a temperatura na matriz aumenta mais rapidamente após o início da aplicação da força.

A temperatura nas matrizes aumenta até a aplicação da força cessar. Posteriormente, a amostra permanece posicionada no molde por alguns segundos até ser removida. Durante esse tempo, a temperatura da matriz diminui e a temperatura na parte inferior da geratriz tem um ligeiro aumento. Esse aumento na temperatura no ponto Bm da geratriz ocorre, pois, a tensão normal cessa e as lacunas de ar entre os picos de rugosidade se formam novamente entre as superfícies dos corpos. Os picos de rugosidade se deformam durante a aplicação da força, entretanto as superfícies de contato não se conectam mais completamente. Assim, a grande condução de calor no estado sólido sem a aplicação de força é cancelada. No entanto, o tempo é muito curto para que ocorra uma compensação da diferença de temperatura dentro da peça de trabalho. Ademais, a medida que a diferença de temperatura entre os corpos em contato diminui, a taxa de troca de calor diminui.

Nos testes realizados sem o uso de máscaras metálica foi observado, no termopar Mi0, o valor máximo de 290,9°C. A geratriz no ponto Bs apresentou uma taxa de resfriamento média de 9°C/s, durante o forjamento. No experimento com o uso de máscara a temperatura máxima registrada pelo termopar Mi01 foi de 143,15°C. Isto representa 51% menor que a temperatura registrada no experimento sem máscara. Este resultado é influenciado pelo comportamento da máscara durante o experimento, a qual adiciona uma nova zona de contato. Assim, as resistências de contato presentes em cada superfície de troca de calor implicam em uma restrição em parte da transferência de calor.

A temperatura na máscara monitorada pelo termopar Masc no experimento de forjamento, apresentou um valor máximo de 306,14°C. Também foi constatado um retardo no impacto térmico no termopar Mi01 de 4 segundos. Mesmo após a retirada da geratriz, a temperatura na máscara manteve um valor elevado durante seu resfriamento. O uso da máscara

provocou uma redução na temperatura na geratriz mais acentuada. Por exemplo, o ponto Bs apresentou uma taxa de resfriamento média de 25°C/s durante o processo.

Com base nas curvas de temperatura, é possível concluir que a utilização da máscara metálica reduz significativamente a temperatura nas superfícies da cavidade da matriz. Assim, o uso deste método de proteção resulta em matrizes melhor protegidas contra falha de natureza térmica, como por exemplo fadiga térmica.

5.2 MODELOS NUMÉRICOS

Com a aquisição dos valores de temperatura pelos testes experimentais, foram criados modelos numéricos tanto para o teste de transferência de calor pelo tempo de contato como para o teste de forjamento em matriz aberta.

Com base nas curvas de temperatura dos experimentos, o processo pode ser dividido em sub-etapas. Com base em simulações individuais, o processo real pode ser desenvolvido. Uma vez que a duração dos passos individuais do processo varia para cada experimento realizado, torna-se difícil representar precisamente todos os experimentos.

Os modelos numéricos foram criados com o objetivo de realizar uma análise inversa para determinar os coeficientes de transferência de calor dos experimentos realizados.

Testes de transferência de calor pelo tempo de contato: Modelo numérico

Os modelos numéricos foram utilizados para a determinação dos coeficientes de transferência de calor através de uma análise inversa. Apenas foram estudados os coeficientes de transferência de calor para o caso de contato direto e com o uso de máscaras metálicas, devido ao escopo deste trabalho.

No modelo numérico para o caso de contato direto, os valores de temperatura na matriz (M01) apresentaram, nos primeiros instantes, valores superiores aos valores experimentais. A diferença máxima medida foi de 61,2°C aos 5s de teste. A partir dos 20 segundos de experimento os valores do modelo numérico apresentaram boa similaridade aos valores experimentais, conforme apresentado na Figura 63. Os valores de temperatura monitorados na geratriz (ponto B01), por sua vez, apresentaram valores semelhantes. Quando comparado com os valores experimentais, o modelo apresentou uma diferença média de 32°C entre os 20 segundos aos 115 segundos, conforme Figura 64.

Em relação aos valores obtidos pelo modelo numérico para o experimento com o uso de máscaras metálicas os valores apresentaram com aproximação aos valores experimentais tanto na máscara e como na matriz, conforme apresentado nas Figuras 66, 67 e 68.

Portanto, baseado nos valores obtidos pelo modelo numérico é possível concluir que o modelo numérico criado apresenta uma correlação satisfatória aos experimentos realizados.

Testes de forjamento a quente em matriz aberta: Modelo numérico

Os valores obtidos pelo modelo numérico para o experimento de forjamento com e sem máscaras apresentaram pequenas discrepâncias quando comparados aos resultados dos experimentos físicos.

Conforme Figura 70, os valores registrados tanto na matriz quanto na geratriz apresentaram boa correlação para o modelo para o experimento sem o uso de máscaras. Para os valores nos pontos Mi01, verificou-se uma diferença de 12 °C no ponto máximo entre simulação numérica e experimento.

No experimento para o forjamento com o uso de máscara de proteção, as temperaturas registradas na geratriz apresentaram uma grande diferença aos valores experimentais. Este comportamento também foi evidenciado para a temperatura no ponto Mi01.

Cabe ressaltar, que durante execução do experimento físico, ocorreu deformação da máscara devido às pressões impostas no experimento. Ademais, durante o afastamento da matriz superior houve adesão temporária da máscara na geratriz devido à massa da máscara ser menor do que a da geratriz. Acredita-se que estes sejam possíveis motivos para a queda de temperatura no ponto Mi01 enquanto que no ponto Masc a temperatura permaneceu aumentando.

Outra circunstância relevante e que pode justificar a queda de temperatura nos experimentos físicos na geratriz (Bm e Bs) é que a temperatura elevada da geratriz no experimento com máscara a superfície superior ocasionou adesão da máscara. Esta adesão resulta em um contato prolongado entre máscara e geratriz aquecido, o que acarreta em um registro de temperatura discrepante em relação ao modelo numérico criado. O modelo numérico criado não considera esta adesão, considerando tempos de contato ideais.

5.3 FATORES A SEREM OBSERVADOS

Os termopares foram testados quanto à sua funcionalidade antes de serem utilizados. No entanto, nenhuma comparação da medição dos termopares individuais foi realizada e, portanto, nenhuma calibração destes foi feita. Portanto, é possível que as medições de temperatura dos termopares individuais possuam variação. Ademais, após a realização de cada experimento, os termopares utilizados eram reutilizados para o próximo experimento. Nos experimentos de transferência de calor pelo tempo de contato apenas os termopares das matrizes e máscaras foram reutilizados. Os termopares da geratriz eram cortados e submetidos à soldagem de seus terminais. Uma vez que nenhuma calibração dos termopares foi realizada mesmo após este reparo, pequenas flutuações nos valores de temperatura medidos são possíveis.

5.4 DETERMINAÇÃO DO HTC ATRAVÉS DOS MODELOS INVERSOS

Através de uma modelagem inversa, as curvas de temperatura determinadas nos experimentos e as simulações foram comparadas para determinar um coeficiente de transferência de calor adequado. É necessário salientar que devido aos modelos com o uso de máscara, tanto a máscara metálica quanto a matriz foram assumidas como “matrizes rígidas e com condução de calor”. Portanto, o software interpreta que neste modelo o contato entre máscara e matriz inferior é um contato “matriz/matriz”. Assim, mesmo que possua uma geometria e materiais diferentes, o software assume que o coeficiente de transferência de calor entre estas interfaces seja um valor constante com a temperatura.

Nos experimentos de transferência de calor pelo tempo de contato, os valores resultantes do modelo inverso foram previamente apresentados nas Figuras 65 e 69. Constatou-se que com o uso de máscara, a temperatura na matriz é atenuada, porém o valor do HTC entre geratriz/matriz apresenta valores superiores quando comparados aos valores do experimento com contato direto. No caso, esta diferença ocorre devido ao comportamento da máscara no experimento, a qual ocasiona uma redução mais acentuada na temperatura na geratriz. Adicionalmente, ocorre também um aumento na temperatura na máscara. O valor obtido pelo modelo inverso para a região de contato máscara e matriz foi de $3500\text{W/m}^2\cdot\text{K}$.

Nos experimentos de forjamento em matriz aberta, os valores determinados pelo modelo inverso foram apresentados nas Figuras 72 e 75. Como esperado, os valores do HTC calculados

foram mais elevados que os valores determinados no modelo de transferência de calor pelo tempo de contato. O valor atribuído pelo modelo inverso para o HTC na interface máscara/matriz foi de $3700 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$. Isto representa um aumento de $200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$ quando se compara o modelo de forjamento em matriz aberta e o modelo de transferência de calor pelo tempo de contato.

Os coeficientes de transferência de calor na interface geratriz/máscara apresentaram valores superiores aos encontrados para a interface geratriz/matriz. Isto ocorre, pois a interface máscara/matriz ocasiona uma atenuação na carga térmica durante os experimentos com o uso de máscaras. Portanto, considerando a resistência térmica de contato na interface máscara/matriz, é necessária uma temperatura mais elevada na máscara para que as temperaturas no ponto Mi01 sejam atingidas.

Outra possível fonte de discrepâncias entre experimentos e modelo numérico é devida às condições ideais na simulação. Nenhuma influência externa, como variações na convecção, umidade e camada de óxido, foi considerada na simulação.

6 CONCLUSÕES

O uso de máscara de proteção sobre as matrizes de forjamento tem grande interferência na carga térmica sobre as matrizes.

O tratamento superficial de nitretação possui uma influência pequena na transferência de calor quando comparado com uma matriz sem o tratamento superficial, porém são ainda necessárias análises adicionais, como a influência da espessura da camada nitretada, ou estudos de transferência de calor em curto espaço de tempo.

Dentre os meios interfaciais utilizados nos testes de transferência de calor pelo tempo de contato, o uso de grafite, possui impacto significativo na temperatura atingida na matriz a qual atingindo a temperatura máxima de 286°C próximo a superfície monitorada no ponto M01, fazendo com que esta atinja valores superiores aos testes aqui realizados. Por outro lado, o uso do lubrificante grafitado *LUBRODAL AT Cr6* possui um perfil térmico semelhante ao registrado no experimento com contato direto, atingindo a temperatura máxima de 224°C próximo a superfície monitorada no ponto M01 fato bastante positivo, quando comparado com o experimento com o uso de grafite.

Nos experimentos de forjamento, apenas com uso da máscara, isto é, sem a aplicação de lubrificação, a temperatura registrada na matriz apresentou uma redução de 51% reduzindo em 148°C a temperatura próxima a superfície monitorada no ponto M01.

Com relação à modelagem inversa realizada neste trabalho, investigações adicionais são necessárias para determinar um coeficiente de transferência de calor com maior certeza. Entretanto, os valores de coeficiente de transferência de calor determinados neste trabalho ser aplicados a modelos de simulação criados para o processo de forjamento em matriz aberta.

A metodologia proposta neste trabalho apresenta facilidade em sua execução. Os valores dos coeficientes de transferência de calor encontrados neste trabalho apresentam comportamento semelhante ao encontrado em trabalhos relacionados e seus valores podem ser utilizados em trabalhos futuros.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar novos experimentos de transferência de calor por tempo de contato aplicando pressões variadas, e acompanhando os valores de HTC para cada experimento.

Realizar novos experimentos de forjamento com o uso de lubrificantes e comparar os valores de temperatura entre os experimentos.

Utilizar as ferramentas de modelagens computacionais como o software *MATLAB* fornecido pela *The MathWorks, Inc* para a determinação dos coeficientes de transferência de calor.

Realizar simulações numéricas FEM com os valores de HTC aqui obtidos, visando determinar o comportamento das matrizes em ciclos de forjamento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abachi Siamak Wear analysis of hot forging dies // Master thesis. - [s.l.] : The Graduate School of Natural and Applied Sciences - The Middle East Technical University, 2004.

Altan Taylan , Ngaile Gracious e Shen Gangshu Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications, Volume 1 [Livro]. - Washington : ASM International, 2005.

Altan Taylan e Shirgaokar Manas Advanced die materials and lubrication systems to reduce die wear in hot and warm forging [Relatório]. - Columbus OH. USA : ERC for Net Shape Manufacturing, the Ohio State University, 2007.

Alumina (Aluminum Oxide, Al₂O₃) Material Properties Database [Online] // Material Properties Database. - 18 de 12 de 2018. - <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Alumina-Aluminum-Oxide-Al2O3>.

Bai Q [et al.] An efficient closed-form method for determining interfacial heat transfer coefficient in metal forming [Periódico] // International Journal of Machine Tools & Manufacture 56. - 2012. - pp. 102-110.

Balancin O. Simulação do processo de forjamento a quente de uma peça comercial [online] 08 de 05 de 2009. - <http://www.dema.ufscar.br/termomec/index.php/simulacao-numerica/simulacao-do-forjamento-industrial-de-uma-peca>.

Baoshan Lu [et al.] Heat Transfer Characteristics of Geratriz/Die Interface and Measures to Relieve Thermal Stress for Hot Forging Die [Artigo] // International Journal of Thermophysics Vol. 38: 102. - 2017.

Bardon J. P. [et al.] Bilan des principales recherches sur les résistances thermiques de contact. [Relatório]. - Laboratoire de Thermocinétique. : Rapport D.E.T.B. 7101, 70p., 1971.

Bardon J. P. Heat Transfer at solid-solid interface : basic phenomenon, recent works. [Artigo] // Proc. Eurotherm, N° 4, Nancy, 28. - 1988. - pp. 40-47.

Baskharone Erian A. Thermal Science [Livro]. - Texas : McGraw-Hill, 2012.

Behrens B. A. e Schaefer F. Prediction of wear in hot forging tools by means [Artigo] // Journal of Materials Processing Technology 167. - 2005. - pp. 309-315.

Behrens B. A. [et al.] Numerical analysis of tool failure in hot forging processes [Periódico] // Obróbka Plastyczna Metali t. XIX nr 4. - 2008. - pp. 11-17.

Benedyk J. C. High Performance Alloys Database. - 2008.

Burte P. R. [et al.] Measurement and Analysis of Heat Transfer and Friction During Hot Forging [Artigo] // Journal of Engineering for Industry Vol. 112 - Transactions of the ASME. - 1990. - pp. 332-339.

Callister Willian D. Ciencia e engenharia de materiais: Uma intrudução [Livro]. - [s.l.] : LTC, 2002.

Cancelos R. L. [et al.] Analysis of the thermo-mechanical deformations in a hot forging tool by numerical simulation [Conferência] // International Conference on Materials, Processing and Product Engineering. - Leoben Àustria : [s.n.], 2015.

Cetlin P. R. Estudo do desgaste em uma matriz de forjamento a quente pela técnica numérica de elementos finitos [Periódico] // Forge , v. 15. - 2014. - pp. 25-28.

Chander Subhash e Chawla Vikas Failure of Hot Forging Dies –An Updated Perspective [Conferência] // 5th International Conference of Materials Processing and Characterization.. - [s.l.] : Materials Today, 2016. - pp. 1147–1157.

Chang C. C. e Bramley N. A. Determination of the heat transfer coefficient at the workpiece-die interface for the forging process [Artigo] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture 216(8). - 2016. - pp. 1179-1186.

Chang Ying [et al.] Investigation of the factors influencing the interfacial heat transfer coefficient in hot stamping [Periódico] // Journal of Materials Processing Technology 228. - 2016. - pp. 25-33.

Clausing A. M. Heat transfer at the interface of dissimilar metals - The influence of thermal strain [Artigo] // International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 9 . - 1966. - pp. 791-801.

Costa Luana de Lucca [et al.] Máscaras metálicas de DP600 em superficies de matrizes de forjamento. [Periódico] // REVISTA FERRAMENTAL. - 2016. - pp. 29-31.

Culham J. R. [et al.] Design, assembly and commissioning of a test apparatus for characterizing thermal interface materials [Conferência] // ITherm 2002. Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems. - 2002. - pp. 128-135.

Dahl Colby, Vazquez Victor H e Altan Taylan Estimation of die wear in hot forging [Conferência] // Fifth Precision Forging Conference. - 1999.

Deshpande M, Groseclose A e Altan T Selection of Die materials and surface treatments for increasing die life in hot and warm forging [Conferência] // Proceedings of the FIATECH Technology Conference & Showcase. - 2011.

Dieter George E. Machanical Metalurgy [Livro]. - [s.l.] : McGaraw Hill, 1986.

Rosenstock Dirk, Segebade Thore E., Hirt Gerhard. First Experimental and Numerical Study on the Use of Sheet Metal DieCovers for Wear Protection in Closed-die Forging. [Artigo] // Key Engineering Materials. - 2015. - Julho 2015 : pp. 651-653.

Dworzak Łukasz, Hawryluk Marek e Ziembra Jacek Wear Analysis of Die Inserts in The Hot Forging Process of a Forked Type Forging Using Reverse Scanning Techniques [Artigo] // Advances in Science and Technology, Volume 11, Issue 4.. - 2017. - pp. 225–238.

Farias Marcelo Fernandes Determinação da Influência de Parâmetros de Processo de Forjamento a Quente Utilizando DOE (PROJETO DE EXPERIMENTOS) // Dissertação de Mestrado. - Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, 2017.

Filho Angelo Caporalli Sistema Especialista para o Forjamento a Quente de Precisão // Dissertação de Mestrado. - Campinas : Universidade Federal de Campinas-UNICAMP, 2003.

Filho Celso Rosendo Bezerra, Laurent Michel e Raynaud Martim A resistência térmica de contato [Conferência] // Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. - Natal, RN. : ABCM, 2000.

Flausino Paula Cibely Alves Desgaste de uma matriz de forjamento a quente considerando o desgaste devido ao revenimento // Dissertação de Mestrado. - [s.l.] : UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, 2010.

Fletcher L. S. Recent Developments in Contact Conductance Heat Transfer [Artigo] // Journal of Heat Transfer- Vol. 110. - 1988. - pp. 1060-1070.

Gronostajski Zbigniew [et al.] The failure mechanisms of hot forging dies [Artigo] // Materials Science & Engineering A 657. - 2016. - pp. 147-160.

Haußmann Ann-Katrin Charakterisierung des druckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten und dessen Auswirkungen auf das Gesenkschmieden unter Einsatz einer Blechschuttschicht.. - Porto Alegre : [s.n.], 2015. - Masterarbeit.

Hawryluk Marek e Jakubik Joanna Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes [Artigo] // Engineering Failure Analysis 59. - 2016. - pp. 396-409.

Hawryluk Marek Review of selected methods of increasing the life of forging tools in hot die forging processes [Journal] // Archives of Civil and Mechanical Engineering I6. - 2016. - pp. 845-866.

Jaszczak John A. The Graphite Page [Online] // Department of Physics and the A. E. Seaman Mineral Museum. - 18 de 12 de 2018. - <http://pages.mtu.edu/~jaszczak/graphite.html>.

Jenson Jon E. Forging Industry Handbook [Livro]. - Cleveland : Forging Industry Association, 1966.

Junior José Martinho Pelacani Desenvolvimento do forjamento a morno de um componente mecânico com extrusão reversa e direta // Dissertação de Mestrado. - Campinas : Universidade Federal de Campinas-UNICAMP, 2010.

Lange K [et al.] Tool life and tool quality in bulk metal forming [Conferência] // CIRP annals - International Academy for Production Engineering. - 1992. - pp. 667-675.

Laurent M. Contribution à l'étude des échanges de chaleur au contact de deux matériaux. // Thèse de doctorat. - Lyon : Fac. des Sciences de Lyon, 1969.

Lenard J. G. An Experimental Study of Heat Transfer in Metal-Forming Processes [Conferência] // CIRP Annals, Volume 41 - 1992. - pp. 307-310.

Madhusudana Chakravarti V. Thermal Contact Conductance [Livro]. - Sydney, NSW, Australia : Springer, 2014.

Magalhães F. de Castro [et al.] Fadiga Térmica De Matrizes [Periódico] // Forge. - 2014. - pp. 32-36.

Magalhães F. de castro [et al.] Susceptibilidade à Fadiga Térmica de Matrizes [Periódico] // Tecnol. Metal. Mater. Miner. São Paulo, v. 11, n. 2. - 2014. - pp. 131-137.

Magri Mário lopes Influência da topografia superficial na vida da matriz de forjamento a quente. // Dissertação de Mestrado. - Campinas : Universidade Federal de Campinas-UNICAMP, 2011.

Magri Mario Lopes, Diniz Anselmo Eduardo e Button Sérgio Tonini Influence of surface topography on the wear of hot forging dies [Artigo] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 65, n. 1-4.. - 2013. - pp. 459-471.

Mantelli M. B. H. e Yovanovich M. M. Thermal Contact Resistance [Seção do Livro] // Spacecraft Thermal Control Handbook: Volume I: Fundamental Technologies, 2nd Edition / A. do livro Gilmore D. G.. - Reston, Virginia : The Aerospace Press, 2002.

Marques Angela Selau, Martins Vinicius e Schaeffer Lirio Benefícios da Simulação Computacional no Processo de Forjamento [Conferência] // XVI - Conferência Internacional de Forjamento. - Porto Alegre : [s.n.], 2012.

McQueen H. J. [et al.] Hot working characteristics of steels in austenitic state. [Artigo] // Journal of Materials Processing Technology, Volume 53 - 1995. - pp. 293-310..

Mesquita Rafael Agnelli e Haddad Paulo de Tarso Propriedades fundamentais dos aços ferramenta para matrizes de forjamento [Conferência] // Conferência Internacional em Forjamento. - Porto Alegre : [s.n.], 2009.

Metals Handbook Forming and Forging Vol. 14th [Livro]. - Washington : ASM International, 1989.

Metals Handbook Properties and Selection: Irons and Steels and High-Performance Alloys, Vol. 1, 10th edition [Livro]. - Washington : ASM International, 1990.

Miller Patricia Forging-Die Material Development: From Research to Implementation [Periódico] // Forge. - 2009. - pp. 24-27.

Mueller Christoph e Schruoff Ingolf Steel selection contributing to wear reduction of forging dies [Conferência] // Forgetech . - India : [s.n.], 2016.

Polozine Alexandre Desenvolvimento da técnica analítica para determinar a resistencia térmica de contato no processo de forjamento. // Tese de Doutorado. - Porto Alegre : UFRGS - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgica e de Materiais, 2009.

Polozine Alexandre Desenvolvimento da técnica para determinação dos parâmetros térmicos de contorno aplicados ao projeto de peças forjadas. // Dissertação de mestrado. - Porto Alegre : UFRGS - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2004.

Rodrigues Jorge e Martins Paulo Tecnologia Mecânica: Tecnologia da Deformação Plástica - Vol. II Aplicações Industriais [Livro]. - Lisboa : Escolar, 2005.

Rywotycki M. [et al.] Modelling of Heat transfer at the solid to solid interface [Artigo] // Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 61, No 1.. - 2016. - pp. 341-346.

Santaella Mauricio Lopez Fatores de influência no desgaste de matrizes de forjamento a quente de bielas automotivas // Dissertação de mestrado. - [s.l.] : Universidade Estadual de Campinas - Departamento de Engenharia de Materiais, 2009.

Schaeffer L. e Rocha A. Conformação Mecânica: Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação [Livro]. - Porto Alegre - RS : Editora Imprensa Livre, 2007. - 1ª Edição.

Schaeffer Lirio Forjamento - Introdução ao Processo [Livro]. - Porto Alegre : Imprensa Livre, 2006.

Schuler GmbH Metal Forming Handbook [Livro]. - Berlin : Springer, 1998.

Schuler, Incorporated; Technologies & products
(https://www.schulergroup.com/major/us/technologien/produkte/grundlagen_massivumformung_gesenkschmieden/index.html).

Spittel M. e Spittel T. Steel symbol/number: 22MnB5/1.5528 [Seção do Livro] // Metal Forming Data of Ferrous Alloys - deformation behaviour. - Berlin : Springer, 2009.

Summerville E., Venkatesan K. e Subramanian C. Wear processes in hot forging press tools [Artigo] // Materials & Design Volume 16 Number 5. - 1995. - pp. 289-294.
(Balancin, 2015)

Tanaka Toshiaki [et al.] Prediction of Hot Forging Die Life Using Wear and Cooling Model [Artigo] // R & D Review of Toyota CRDL, Vol. 40, n. 1. - 2005. - pp. 43-49.

Villanueva Eliseo P. Thermal contact conductance. // PhD thesis. - Sydney : The University of New South Wales, 1997.

Wang Min [et al.] Inverse evaluation of equivalent contact heat transfer coefficient in hot stamping of boron steel [Artigo] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2016. - pp. 2925–2932.

Wang Shu-qi [et al.] Effect of Alloying Elements on Thermal Wear of Cast Hot-Forging Die Steels [Artigo] // International Journal of Iron and Steel Research. Volume 13 - 2006. - pp. 53-59.

Wei Min-xian [et al.] Effect of microstructures on elevated-temperature wear resistance of a hot working die steel. [Artigo] // Journal of Iron and Steel Research, International 18.10. - 2011. - pp. 47-53.

Zdenek Chval Effect of the heat load to the forging machines [Periódico] // MM Science Journal 420-421. - 2013.