

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS

ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGEM

**DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA ANALÍTICA
PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO
NO PROCESSO DE FORJAMENTO**

ALEXANDRE POLOZINE

Tese de Doutorado

PORTO ALEGRE, 2009

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS

ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGEM

**DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA ANALÍTICA
PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO
NO PROCESSO DE FORJAMENTO**

ALEXANDRE POLOZINE

Tese desenvolvida na Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Esta tese foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia, e aprovada em sua forma final pela Coordenadoria do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais–PPGEM, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Lírío Schaeffer – PPGEM/UFRGS

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Alexandre dos Santos – PUC / RS

Prof. Dr. Eduardo Cristiano Milke – CEFET / Pelotas-RS

Prof. Dr. Jaime Álvares Spim Júnior– PPGEM / UFRGS

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer– PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Volnei Borges – PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

DEDICO O PRESENTE TRABALHO:

Ao Sr. THOMAS JOHANN SEEBECK, físico russo, descobridor do efeito termoelétrico em 1821.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro da pesquisa realizada no quadro da presente tese.

Ao Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer, coordenador do Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM, pelo apoio, auxílio e orientação, sem o qual a pesquisa realizada na presente tese não seria terminada com sucesso.

Aos colegas do Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM, pela ajuda contínua no uso da língua portuguesa.

À Dra. Boutonnet Anne-Sophie (Marchand), pesquisadora do Centro de Calor de Lyon (Centre de Thermique de Lyon – CETHIL), França, pela perfeita coletânea de informações sobre os estudos do fenômeno da Resistência Térmica de Contato, a qual facilitou muito a pesquisa realizada na presente tese.

Aos cientistas do instituto IBF (Institut für Bildsame Formgebung, Aachen), Alemanha, pelos esforços na obtenção da coletânea de dados numéricos que caracterizam os processos típicos de forjamento, sem a qual não seria possível avaliar os resultados da pesquisa realizada na presente tese.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XVII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	XIX
RESUMO.....	XXIII
ABSTRACT.....	XXIV
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 PARÂMETROS TÉRMICOS DO PROCESSO DE FORJAMENTO – ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 Terminologia utilizada nas referências científicas para denominar o fenômeno de transferência de calor através da interface amostra – ferramenta.....	5
2.2 Natureza da Resistência Térmica de Contato.....	6
2.3 Propriedades termofísicas de superfícies de corpos sólidos.....	8
2.4 Métodos para determinar a Resistência Térmica de Contato.....	9
2.4.1 Métodos experimentais para determinar a Resistência Térmica de Contato.....	10
2.4.1.1 Métodos de determinação experimental da Resistência Térmica de Contato, baseados na medição direta de temperaturas superficiais.....	11
2.4.1.2 Métodos de determinação experimental da Resistência Térmica de Contato, baseados na medição indireta de temperaturas superficiais.....	14
2.4.2 Método misto para determinar a Resistência Térmica de Contato.....	17

2.4.3	Artigos mais recentes relacionados com a determinação da resistência térmica de contato.....	20
2.5	Valores da Resistência Térmica de Contato, citadas na literatura.....	20
2.6	Incerteza da Resistência Térmica de Contato, mostrada na literatura.....	21
2.7	Resumo dos métodos para determinar a Resistência Térmica de Contato.....	22
3	MODELO FÍSICO DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE AMOSTRA PARA A FERRAMENTA.....	23
4	MODELO MATEMÁTICO DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE AMOSTRA PARA A FERRAMENTA.....	25
5	TECNICA DESENVOLVIDA PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO	29
5.1	Escolha do método de medição de temperaturas.....	29
5.2	Escolha do tipo de termopares para medir as temperaturas interfaciais.....	30
5.2.1	Investigação da junta de medição não isotérmica do termopar.....	30
5.2.1.1	Técnica para determinar a temperatura superficial da amostra metálica.....	32
5.2.1.1.1	Princípio de determinação das temperaturas na interface de corpos metálicos.....	34
5.2.1.1.2	Vantagens do método desenvolvido de medição de temperaturas superficiais.....	36
5.2.1.1.3	Áreas de aplicação do método de medição de temperaturas superficiais.....	36
5.3	Procedimento para determinar a Resistência Térmica de Contato.....	36
5.4	Montagem experimental para a determinação da Resistência Térmica de Contato “material forjado – ferramenta”.....	39

5.4.1	Vista da montagem experimental.....	39
5.4.2	Elementos principais da montagem experimental.....	40
5.4.2.1	Matrizes.....	40
5.4.2.1.1	Revestimento de matrizes.....	41
5.4.2.1.2	Suporte de matrizes.....	41
5.4.2.1.3	Sistema de aquecimento de matrizes	42
5.4.2.2	Amostras.....	43
5.4.2.2.1	Revestimento de amostras.....	43
5.4.2.2.2	Suporte de amostras.....	44
5.4.2.2.3	Sistema de aquecimento de amostras.....	44
5.4.2.3	Sensores de temperatura.....	45
5.4.2.3.1	Sistema de medição de temperatura superficial da matriz.....	45
5.4.2.3.2	Sistema de medição de temperatura superficial da amostra de titânio.....	46
5.4.2.3.3	Sistema de medição de temperatura superficial da amostra de aço.....	47
5.4.2.3.4	Sistema de medição de temperatura superficial da amostra de alumínio.....	47
5.4.2.3.5	Microgeometria de sistema de medição de temperaturas superficiais.....	48
5.4.2.3.6	Sistema de medição de temperaturas volumétricas.....	49
5.4.2.4	Sistema de medição e aquisição de dados.....	49
5.4.3	Comparação da montagem desenvolvida e as conhecidas.....	50
5.4.4	Eficiência da montagem desenvolvida.....	52

6 APLICAÇÃO DA NOVA TÉCNICA NA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DE CONTATO DOS PARES DE MATERIAIS TÍPICOS PARA FORJAMENTO A QUENTE.....	53
6.1 Equipamento e materiais utilizados para determinar a Resistência Térmica de Contato.....	53
6.1.1 Listas de equipamento e materiais.....	53
6.1.2 Propriedades físicas de amostras e outros materiais.....	54
6.2 Desenvolvimento experimental para determinação da Resistência Térmica de Contato.....	58
6.2.1 Calibração da prensa e do equipamento de medição de temperaturas.....	58
6.2.1.1 Calibração da prensa hidráulica.....	59
6.2.1.2 Calibração do equipamento de medição de temperaturas....	59
6.2.2 Experimentos térmicos com as amostras da liga de titânio Ti6Al4V.....	60
6.2.2.1 Dimensões e massas dos elementos do sistema amostra de titânio – ferramenta.....	60
6.2.2.2 Experimentos preliminares com a amostra de titânio Ti6Al4V.....	62
6.2.2.3 Experimento básico com a amostra de titânio Ti6Al4V.....	62
6.2.2.3.1 Condições do experimento básico com a amostra de titânio Ti6Al4V.....	62
6.2.2.3.2 Descrição do experimento básico com a amostra de titânio Ti6Al4V.....	63
6.2.2.3.3 Dados obtidos no experimento básico com a amostra de titânio.....	67
6.2.2.3.4 Normalização dos dados experimentais	

obtidos no experimento básico com a amostra de titânio Ti6Al4V.....	68
6.2.2.3.5 Tratamento dos dados experimentais obtidos no experimento básico com a amostra de titânio Ti6Al4V.....	72
6.2.3 Experimentos térmicos com as amostras de liga de alumínio AA6351.....	77
6.2.3.1 Dimensões e massas dos elementos do sistema amostra de alumínio–ferramenta.....	78
6.2.3.2 Experimentos preliminares com a amostra de alumínio AA6351.....	79
6.2.3.3 Experimento principal com a amostra de alumínio AA6351.....	79
6.2.2.3.1 Condições do experimento principal com a amostra de alumínio.....	79
6.2.2.3.2 Descrição do experimento principal com a amostra de alumínio AA6351.....	80
6.2.2.3.3 Dados obtidos no experimento principal com a liga AA6351.....	81
6.2.2.3.4 Normalização dos dados experimentais obtidos no experimento principal com a liga de alumínio AA6351.....	82
6.2.2.3.5 Tratamento dos dados experimentais obtidos no experimento principal com a liga de alumínio AA6351.....	83
6.2.4 Experimentos térmicos com as amostras de aço ABNT 1045.....	85
6.2.4.1 Dimensões e massas dos elementos do sistema	

amostra de aço – ferramenta.....	85
6.2.4.2 Experimentos preliminares com a amostra de aço	
ABNT 1045.....	87
6.2.4.3 Experimento principal com a amostra de aço	
ABNT 1045.....	87
6.2.4.3.1 Condições do experimento principal com a	
amostra de aço ABNT 1045.....	87
6.2.4.3.2 Descrição do experimento principal com a	
amostra de aço ABNT 1045.....	88
6.2.4.3.3 Dados obtidos no experimento principal	
com a amostra de aço ABNT 1045.....	90
6.2.4.3.4 Normalização dos dados obtidos	
no experimento principal com a amostra de	
aço ABNT 1045.....	90
6.2.4.3.5 Tratamento dos dados obtidos no experimento	
principal com amostra de aço ABNT 1045.....	91
6.3 Avaliação da confiabilidade dos valores da Resistência Térmica	
de Contato obtidos na presente pesquisa	93
6.3.1 Incerteza da Resistência Térmica de Contato.....	93
6.3.2 Repetitividade dos valores da Resistência Térmica de Contato.....	93
6.3.3 Correlação entre os valores da Resistência Térmica de Contato	
obtidos na presente tese e os dos outros trabalhos científicos.....	95
7 CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS.....	97
7.1 Comentários finais.....	97
REFERÊNCIAS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

N°	–	TÍTULO	p.
Figura 1.1	–	Plano de pesquisa e desenvolvimento da técnica analítica para determinar a Resistência Térmica de Contato material forjado – ferramenta.....	3
Figura 2.1	–	Representação gráfica de parametros mais importantes para simulações numéricas do processo de forjamento a quente.....	4
Figura 2.2	–	Modelo macroscópico da interface amostra – ferramenta. Fonte: Li e Sellars (1996).....	6
Figura 2.3	–	Representação gráfica da Resistência Térmica de Contato em função de pressão. Fonte: Li e Sellars (1996).....	7
Figura 2.4	–	Esquema da estrutura cristalina de um corpo sólido.....	8
Figura 2.5	–	Montagem típica para determinar a Resistência Térmica de Contato (<i>RTC</i>). Fonte: Boutonnet (1998).....	10
Figura 2.6	–	Esquema de medição direta de temperaturas superficiais. Fonte: Kellow, Bramley e Bannister (1969).....	11
Figura 2.7	–	Esquema de medição direta de temperaturas superficiais. Fonte: Chang e Bramley (2002).....	12
Figura 2.8	–	Montagem para medição de temperaturas superficiais, recomendada pela ASTM. Fonte: ASTM (1981).....	13
Figura 2.9	–	Esquema detalhado de fluxos de calor na montagem do Chang e Bramley (2002).....	14
Figura 2.10	–	Esquema típico de medição indireta de temperaturas interfaciais. Fonte: Rosochowska et al (2004).....	15
Figura 2.11	–	Distribuição de temperaturas no material da amostra (ferramenta) num regime estacionário de transferência de calor.....	15

Figura 2.12 – Esquema da medição indireta de temperaturas. Fonte: Rosochowska et al (2004).....	16
Figura 2.13 – Curvas experimentais e as curvas teóricas do resfriamento da amostra de aço 100Cr6. Fonte: Caliskanoglu et.al (2002).....	18
Figura 3.1 – Representação esquemática do modelo físico do processo de transferência de calor de amostra para a ferramenta.....	23
Figura 4.1 – Distribuição de temperaturas no material da amostra forjada.....	27
Figura 4.2 – Características analíticas da curva de resfriamento da amostra forjada.....	28
Figura 5.1 – Esquema de medição de temperatura superficial por um termopar tradicional.....	30
Figura 5.2 – Desenho esquemático da montagem para determinar as temperaturas superficiais da amostra metálica.....	32
Figura 5.3 – Desenho esquemático da interface AB de dois sólidos metálicos.....	34
Figura 5.4 – Montagem experimental de dois sensores de temperatura (fragmento).....	35
Figura 5.5 – Esquema de determinação da Resistência Térmica de Contato (RTC).....	38
Figura 5.6 – Vista da montagem experimental para determinar a Resistência Térmica de Contato (RTC).....	39
Figura 5.7 – Matriz.....	41
Figura 5.8 – Revestimento de matrizes.....	41
Figura 5.9 – Suporte de matrizes.....	42
Figura 5.10 – Esquema de aquecimento de matrizes.....	42
Figura 5.11 – Amostra.....	43
Figura 5.12 – Revestimento de amostras.....	43
Figura 5.13 – Suporte de amostras.....	44
Figura 5.14 – Esquema de aquecimento de amostras.....	44
Figura 5.15 – Sistema de medição de temperatura superficial da matriz.....	45

Figura 5.16 – Técnica de acoplamento de fios na região superficial da matriz.....	46
Figura 5.17 – Sistema de medição de temperatura superficial da amostra de titânio.....	46
Figura 5.18 – Sistema de medição de temperatura superficial da amostra de alumínio.....	47
Figura 5.19 – Técnica de instalação de fios na região superficial da amostra de alumínio.	47
Figura 5.20 – Técnica de acoplamento de fios na região superficial da amostra de alumínio.....	48
Figura 5.21 – Microgeometria do sistema de medição de temperatura superficial.....	48
Figura 5.22 – Esquema de medições de temperaturas volumétricas.....	49
Figura 5.23 – Tendência na profundidade de instalação de sensores de temperatura superficial.....	50
Figura 5.24 – Dimensões de sensores de temperatura utilizados nas últimas décadas na determinação da Resistência Térmica de Contato amostra – ferramenta.....	51
Figura 6.1 – Representação gráfica e analítica do calor específico (médio) de alumínio e suas ligas em função de temperatura.....	55
Figura 6.2 – Representação gráfica e analítica de valores do calor específico da liga Ti6Al4V, em função de temperatura.....	56
Figura 6.3 – Representação gráfica e analítica de valores do calor específico de aço ABNT 1045 em função de temperatura.....	57
Figura 6.4 – Representação esquemática da montagem experimental para determinar a incerteza relativa de indicações de canais 1 e 2 do aparelho USB–TC.....	59
Figura 6.5 – Desenho esquemático da amostra da liga de titânio Ti6Al4V.....	61
Figura 6.6 – Representação gráfica de aquecimento da ferramenta.....	64
Figura 6.7 – Estado térmico da amostra de titânio Ti6Al4V na etapa de preparação para o ensaio de compressão.....	65

Figura 6.8 – Estado térmico da amostra de titânio Ti6Al4V no início de compressão.....	66
Figura 6.9 – Temperaturas do sistema amostra de titânio – matriz de AISI H13 sob pressão de 31,3 MPa.....	67
Figura 6.10 – Experimento básico (completo) com a liga de titânio Ti6Al4V.....	67
Figura 6.11 – Temperaturas do sistema amostra de titânio – ferramenta	68
Figura 6.12 – Discrepância entre as curvas A e B de resfriamento da amostra de titânio Ti6Al4V.....	68
Figura 6.13 – Convexidade das curvas A e B de resfriamento da amostra de titânio Ti6Al4V (fragmento).....	69
Figura 6.14 – Curvas A e A1 de resfriamento da amostra de titânio Ti6Al4V.....	70
Figura 6.15 – Temperaturas normalizadas do sistema amostra de titânio – ferramenta.....	71
Figura 6.16 – Esquema de medição de temperaturas na interface amostra de titânio – ferramenta.....	71
Figura 6.17 – Temperatura média da amostra de titânio Ti6Al4V, relacionada com o seu calor sensível	72
Figura 6.18 – Taxa de resfriamento da amostra de titânio Ti6Al4V.....	74
Figura 6.19 – Gradiente de temperatura na interface amostra de titânio – ferramenta.....	74
Figura 6.20 – Resistência Térmica de Contato (a) e o coeficiente α (b) em função do tempo de forjamento da amostra de titânio Ti6Al4V.....	75
Figura 6.21 – Resistência Térmica de Contato (a) e o coeficiente α (b) em função do gradiente de temperatura na interface liga Ti6Al4V – aço AISI H13.....	75
Figura 6.22 – Resistência Térmica de Contato (a) e o coeficiente α (b) em função da temperatura média da interface liga Ti6Al4V – aço AISI H13.....	75
Figura 6.23 – Desenho esquemático da amostra da liga de alumínio AA6351.....	78
Figura 6.24 – Experimento principal (completo) com a liga de alumínio AA6351.....	81

Figura 6.25 – Temperaturas do sistema amostra de alumínio – matriz de AISI H13 sob pressão de 16,4 MPa.....	82
Figura 6.26 – Esquema de medição de temperaturas na interface amostra de alumínio – ferramenta.....	82
Figura 6.27 – Resistência Térmica de Contato (a) e o coeficiente α (b) em função do tempo de forjamento da amostra de alumínio AA6351.....	84
Figura 6.28 – Resistência Térmica de Contato (a) e o coeficiente α (b) em função do gradiente de temperatura na interface liga AA6351 – aço AISI H13.....	84
Figura 6.29 – Resistência Térmica de Contato (a) e do coeficiente α (b) em função da temperatura média da interface liga AA6351– aço AISI H13.....	84
Figura 6.30 – Desenho esquemático da amostra de aço ABNT 1045.....	86
Figura 6.31 – Experimento principal (completo) com aço 1045	89
Figura 6.32 – Temperaturas do sistema amostra de aço – matriz de AISI H13 sob pressão de 23,1 MPa.....	90
Figura 6.33 – Resistência Térmica de Contato (a) e o coeficiente α (b) em função do tempo de forjamento da amostra de aço ABNT 1045.....	91
Figura 6.34 – Resistência Térmica de Contato (a) e o coeficiente α (b) em função do gradiente de temperatura na interface aço ABNT 1045 – aço AISI H13.....	91
Figura 6.35 – Resistência Térmica de Contato (a) e do coeficiente α (b) em função da temperatura média da interface aço ABNT 1045 – aço AISI H13.....	92
Figura 6.36 – Variação do desvio máximo (\square) da Resistência Térmica de Contato em função do tempo de compressão da amostra de alumínio.....	94

ÍNDICE DE TABELAS

N°	–	TÍTULO	p.
Tabela 2.1	–	Comparação do esquema da ASTM de medição de temperaturas superficiais com o esquema do Chang e Bramley.....	13
Tabela 2.2	–	Métodos de obtenção da Resistência Térmica de Contato <i>RTC</i> mostrados nos artigos mais recentes.....	20
Tabela 2.3	–	Valores da Resistência Térmica de Contato, representados nas referências.....	21
Tabela 5.1	–	Comparação dos métodos de determinação da Resistência Térmica de Contato (<i>RTC</i>).....	29
Tabela 6.1	–	Equipamento utilizado nos experimentos.....	53
Tabela 6.2	–	Materiais usados nos experimentos.....	54
Tabela 6.3	–	Calor específico de alumínio e suas ligas [1].....	55
Tabela 6.4	–	Calor específico da liga de titânio Ti6Al4V.....	56
Tabela 6.5	–	Calor específico de aço ABNT 1045.....	57
Tabela 6.6	–	Coeficientes de dilatação térmica de materiais de amostras.....	58
Tabela 6.7	–	Coeficientes de dilatação térmica dos componentes do sistema de medição de temperatura superficial.....	58
Tabela 6.8	–	Dimensões iniciais e a massa da amostra de titânio Ti6Al4V.....	61
Tabela 6.9	–	Dimensões e a massa da matriz de aço AISI H13.....	62
Tabela 6.10	–	Temperaturas de forjamento a quente de ligas de titânio.....	62
Tabela 6.11	–	Condições iniciais do experimento básico com a amostra de titânio Ti6Al4V.....	63
Tabela 6.12	–	Valores da Resistência Térmica de Contato, do coeficiente α e das variáveis do experimento básico com a liga de titânio Ti6Al4V.....	76
Tabela 6.13	–	Incerteza dos parâmetros e das variáveis relacionados com o	

	cálculo da Resistência Térmica de Contato.....	77
Tabela 6.14 –	Dimensões e a massa da amostra da liga de alumínio AA6351.....	78
Tabela 6.15 –	Temperaturas de forjamento a quente de ligas de alumínio.....	79
Tabela 6.16 –	Condições iniciais do experimento principal com a amostra de alumínio AA6351.....	79
Tabela 6.17 –	Valores da Resistência Térmica de Contato, do coeficiente α e das variáveis do experimento básico com a liga de alumínio AA6351.....	85
Tabela 6.18 –	Dimensões e a massa da amostra de aço ABNT 1045.....	86
Tabela 6.19 –	Temperaturas de forjamento a quente de aço ABNT 1045.....	87
Tabela 6.20 –	Condições iniciais do experimento principal com a amostra de aço ABNT 1045.....	87
Tabela 6.21 –	Valores da Resistência Térmica de Contato, do coeficiente α e das variáveis do experimento básico com aço ABNT 1045.....	92
Tabela 6.22 –	Incerteza da Resistência Térmica de Contato (<i>RTC</i>).....	93
Tabela 6.23 –	Valores da Resistência Térmica de Contato (<i>RTC</i>) da interface liga de titânio – aço.....	95
Tabela 6.24 –	Valores da Resistência Térmica de Contato (<i>RTC</i>) da interface liga de alumínio – aço.....	95
Tabela 6.25 –	Valores da Resistência Térmica de Contato (<i>RTC</i>) da interface aço – aço.....	95
Tabela 6.26 –	Correlação entre os valores da Resistência Térmica de Contato (<i>RTC</i>) obtidos na presente tese e os dos outros trabalhos científicos.....	96

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABREVIATURAS (letras latinas)

- A_{int} – área da interface de contato, m²
- b – largura do fio, m
- b_i – profundidade do ponto da medição de temperatura, m
- C_p – calor específico do material do corpo de prova, J/kg·°C
- $C_{sensível}$ – calor sensível transferido no material forjado por seu aquecimento prévio, J
- $C_{deformação}$ – calor gerado no material forjado pela sua deformação plástica, J
- C_{fase} – calor latente de transformação de fase, fornecido no material forjado, J
- dh – deformação linear da amostra, m
- F – força de deformação, N
- h – altura da amostra (da matriz), m
- H – coeficiente da transferência de calor por convecção, W/m²·°C
- j – número da microárea da junta de medição do termopar
- k – coeficiente Seebeck, V·°C⁻¹
- k_i – coeficiente Seebeck para temperatura T_i , V·°C⁻¹
- L – coordenada, m
- m – massa da amostra, kg
- m_a – massa da região (da amostra) afetada pela transformação de fases, kg
- n – quantidade de microáreas com as temperaturas

- diferentes
- na junta de medição do termopar
- Q_{int} – taxa de calor total, transferido do material forjado para a ferramenta de forja, W
- R – largura do rastro do canal superficial, m
- RTC – Resistência Térmica de Contato, $m^2 \cdot K/W$
- S – área total da junta de medição do termopar, m^2
- S_i – microárea i da junta de medição do termopar, m^2
- t – tempo de resfriamento da amostra, s
- t_c – tempo de compressão da amostra durante de processo de conformação a quente, s
- T – temperatura, $^{\circ}C$
- T_A – temperatura no ponto A, $^{\circ}C$
- T_B – temperatura no ponto B, $^{\circ}C$
- T_i – temperatura da microárea S_i da junta de medição do termopar, $^{\circ}C$
- $T_{amostra}$ – temperatura do material na zona de contato com a ferramenta, $^{\circ}C$
- T_{conv} – temperatura convencional, $^{\circ}C$
- $T_{ferramenta}$ – temperatura da ferramenta na zona de contato com o material forjado, $^{\circ}C$
- T_m – temperatura média da amostra, relacionada com o calor sensível do seu material, $^{\circ}C$
- T_{sup} – temperatura da superfície da amostra fora de contato com o termopar, $^{\circ}C$

T_{∞}	– temperatura do meio ambiente, °C
ΔT	– gradiente de temperatura na interface peça – ferramenta de forja, °C
ΔT_f	– alteração de temperatura da amostra, provocada pela transformação de fases do seu material, °C
ΔT_m	– alteração da temperatura média da amostra durante do experimento, °C
dV	– força eletromotriz do termopar, V
W	– energia térmica da amostra, J
\emptyset	– diâmetro
Z_{RTC}	– incerteza da Resistência Térmica de Contato, (m^2K/W)
\square	– quadrado

ABREVIATURAS (letras gregas)

α	– coeficiente de transferência de calor do material forjado para a ferramenta, $W/m^2 \cdot K$
β	– coeficiente de Expansão Térmica Linear, $10^{-6}/^{\circ}C$
ε	– emissividade total de superfície irradiante, (–)
λ	– condutividade térmica do material, $W/m \cdot ^{\circ}C$

SIGLAS

AA	– Aluminium Alloy (Liga de alumínio)
ABNT	– Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABAQUS	– nome da companhia norte-americana de software,

ABAQUS, Inc.

- ASM – American Society for Metals
- ASTM – American Society for the Testing of Materials
- HRC – Unidade de dureza, (Hardness Rockwell C)
- JMNI – junta de medição não isotérmica (do termopar)
- IBF – Institut für Bildsame Formgebung, IBF, Aachen,
Alemanha

Resumo

A Resistência Térmica de Contato entre a ferramenta de forjamento e a peça é um parâmetro importante para a otimização, por simulação computacional, do comportamento do material forjado. Os procedimentos atuais destinados à determinação da Resistência Térmica de Contato apresentam discrepância significativa nos resultados. A falta de valores confiáveis deste parâmetro afeta a precisão da simulação.

Visando a importância das ferramentas computacionais para a otimização do processo de forjamento, no presente trabalho foi desenvolvida uma nova técnica para determinar a Resistência Térmica de Contato. A técnica inovadora inclui o método de medição de temperaturas interfaciais desconhecido anteriormente, a montagem para realizá-lo e o sistema de medição de temperaturas volumétricas. Esta técnica é destinada ao uso sob condições de altas e moderadas temperatura e pressão muito grande, o que é característico da zona de contato material forjado–ferramenta.

A inovação foi testada com sucesso para alguns materiais típicos (aço, liga de alumínio e liga de titânio) utilizados no forjamento a quente ou a morno. Os valores da Resistência Térmica de Contato, obtidos nos testes, são recomendados para uso em programas de simulação computacional.

Palavras–Chaves: Forjamento, Condutividade térmica de contato, Resistência térmica de contato.

Abstract

The Thermal Contact Resistance between a die and a blank is an important parameter in the computer simulation used for the optimization of the blank plastic deformation. The known procedures intended for the determination of the Thermal Contact Resistance show significant discrepancy in results. The lack of reliable values of this parameter affects the precision of the simulation.

Taking in account the importance of computer tools for the optimization of the forging process, a new technique for the determination of the Thermal Contact Resistance has been developed in the present study. The developed technique includes a method for the measurement of the interface temperatures, which was unknown before, and the equipment for the realization of this method as well as the system for the measurement of the volumetric temperatures. This technique is intended for use under moderate and high temperature / high pressure conditions at the die–workpiece interface.

The innovation has been tested successfully on some typical materials (steel, aluminium alloy e titanium alloy) used in warm and hot forging. Values of the Thermal Contact Resistance obtained by these tests are recommended for use in computer simulations.

Keywords: Forging, Thermal Contact Conductance, Thermal Contact Resistance.

Capítulo 1 – Introdução

O forjamento ocupa uma posição importante entre os principais processos de fabricação de peças metálicas. Durante vários milênios e até numa época recente, o forjamento de metais e suas ligas era a base sólida para o progresso tecnológico da humanidade.

A pesquisa permanente sobre melhor qualidade de peças forjadas e a redução de seus custos durava séculos e era realizada empiricamente. Na última década, para alcançar os mesmos objetivos o mais rápido e com despesas menores, a técnica computacional era empregada tanto nos países desenvolvidos como no Brasil e nos países em desenvolvimento.

A otimização do processo de forjamento realiza-se pela simulação computacional do comportamento do material forjado. A base para efetuar os cálculos é um conjunto de condições de contorno e parâmetros físicos do material, determinados a máxima precisão [1].

As propriedades termofísicas de materiais são definitivas para o forjamento, e todas essas propriedades dependem da temperatura [2]. As peças forjadas a morno e a quente têm as tensões reduzidas em relação ao forjamento a frio, a microestrutura mais homogênea, pouco ou nenhum encruamento e alta forjabilidade.

A temperatura inicial de forjamento a quente, um processo industrial de maior importância técnica-econômica, diminui por resfriamento, afetando todos os parâmetros termofísicos da peça forjada. Portanto, a temperatura da peça deve ser rigorosamente controlada.

As perdas térmicas, quantitativamente mais significativas, acontecem através da zona de contato material forjado – ferramenta e são relacionadas com o parâmetro chamado Resistência Térmica de Contato, ou *RTC*.

Infelizmente, o surgimento de técnicas computacionais para a simulação numérica do comportamento do material forjado não era acompanhado pelo desenvolvimento adequado das técnicas analíticas destinadas à determinação da *RTC*. Em consequência, os processos de transferência de calor na zona de contato eram pouco investigados e os valores obtidos da *RTC* eram de pouca utilidade.

Isso criava uma grande contradição entre a eficiência altíssima de técnicas computacionais de simulação e a falta de parâmetros (*RTC*) de materiais, absolutamente

necessários para os cálculos corretos. A falta de informação nessa área forçava os engenheiros industriais a utilizar nos programas de simulação os valores da Resistência Térmica de Contato aproximados e até arbitrários [3], o que resultava em perda significativa das vantagens de simulação computacional.

Visando a importância de ferramentas computacionais para a otimização do processo de forjamento, em função dos objetivos da presente tese neste trabalho foi abordado o seguinte plano de pesquisa e desenvolvimento tecnológico:

1. Revisão bibliográfica sobre a Resistência Térmica de Contato de dois corpos metálicos (*RTC*);
2. Análise, com base na revisão bibliográfica, dos métodos de determinação da *RTC*;
3. Escolha do método ou classe dos mesmos o mais adequado às condições específicas da interface peça – ferramenta;
4. Desenvolvimento, com base na revisão bibliográfica, do modelo físico de forjamento de um corpo metálico;
5. Desenvolvimento, com base no modelo físico, do modelo matemático do processo de transferência de calor através da interface material forjado – ferramenta;
6. Desenvolvimento, com base na revisão bibliográfica, no método escolhido, no modelo físico e matemático e na experiência pessoal do autor da tese, da técnica para determinar a *RTC*, adequada às condições específicas na interface material forjado – ferramenta.
7. Determinar a *RTC* para os pares de materiais típicos utilizados no forjamento a quente, visando testar a técnica desenvolvida.

O plano de pesquisa e desenvolvimento tecnológico descrito acima, é mostrado esquematicamente na figura 1.1.

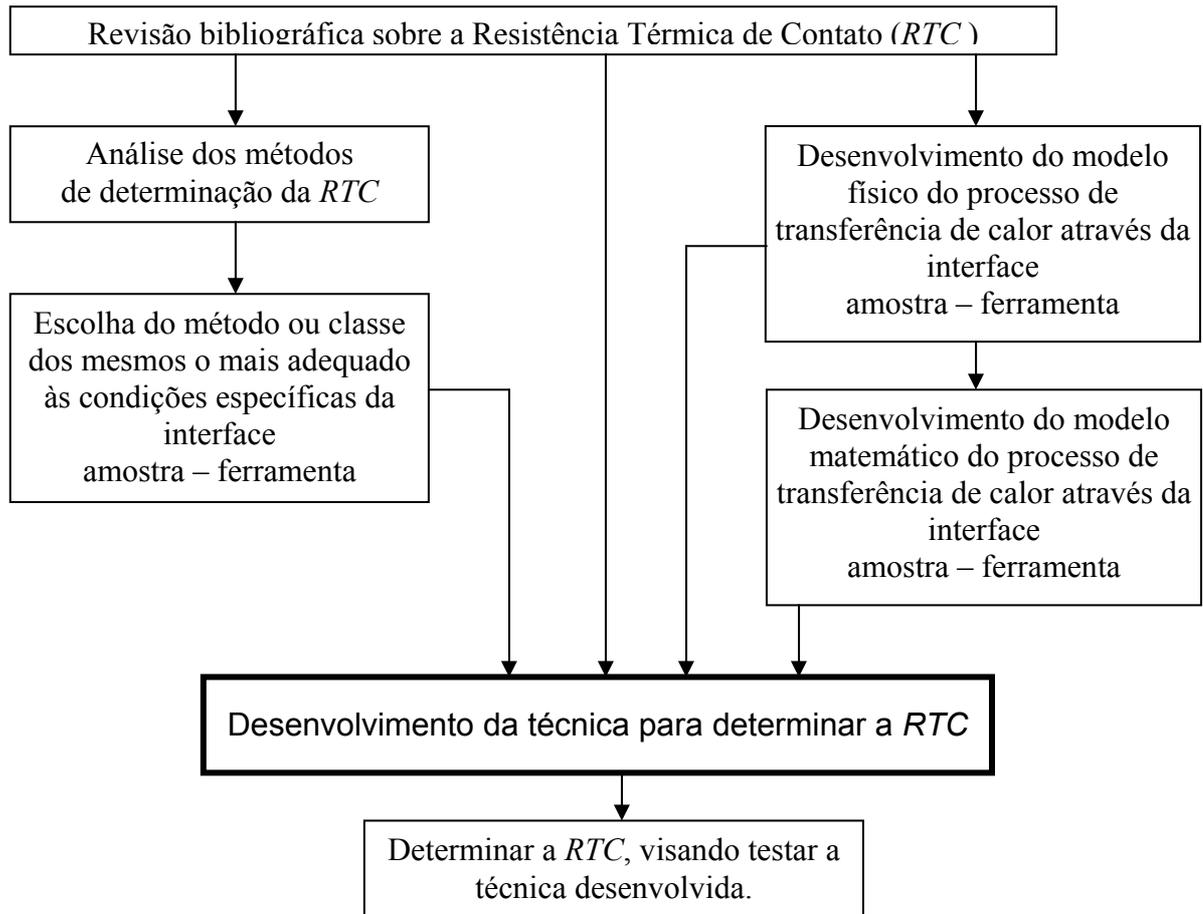


Fig. 1.1 – Plano de pesquisa e desenvolvimento da técnica analítica para determinar a Resistência Térmica de Contato material forjado – ferramenta.

Finalmente, a nova técnica para determinar a Resistência Térmica de Contato, adequada às condições específicas na interface “material forjado – ferramenta” foi desenvolvida.

A nova técnica consiste no (i) novo método de medição de temperaturas superficiais e (ii) nova técnica para determinar a temperatura superficial de amostras metálicas. A nova técnica para determinar a Resistência Térmica de Contato foi testada com sucesso para alguns materiais típicos (aço ABNT 1045, liga de alumínio AA6351 e liga de titânio Ti6Al4V) utilizados no forjamento a quente.

Capítulo 2 – Parâmetros Térmicos do Processo de Forjamento: Estado da Arte

Os parâmetros que caracterizam o estado térmico de material forjado são os dados definitivos para as simulações numéricas e experimentais do processo de forjamento. Os parâmetros térmicos mais importantes para simulações numéricas do processo da deformação plástica são representados esquematicamente na figura 2.1 e são os seguintes:

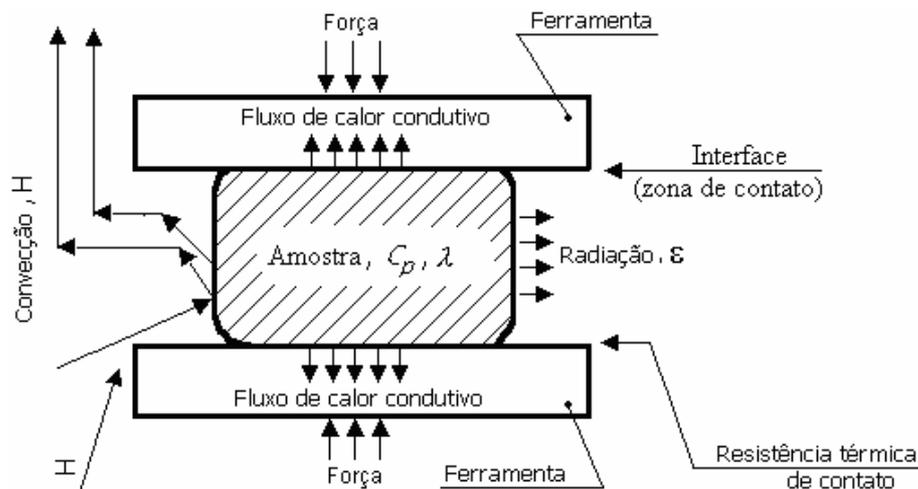


Fig. 2.1 – Representação gráfica de parâmetros mais importantes para simulações numéricas do processo de forjamento a quente.

- Calor específico do material da amostra (C_p).

Define a quantidade de calor transferido na amostra. Quando maior o C_p , menor é a variação de temperatura do tarugo no processo de forjamento e melhor é a sua forjabilidade;

- Condutividade térmica do material da amostra (λ).

Define o gradiente de temperatura no seu material. Quando menor o gradiente de temperatura, melhor é a forjabilidade da amostra;

- Emissividade (ϵ) da superfície da amostra e o coeficiente de transferência de calor por convecção (H) da mesma para o meio ambiente.

Definem a dissipação de energia interna da amostra por radiação e por convecção tanto durante seu movimento para o equipamento de forjamento, quanto no seu forjamento. Quando menor a dissipação de calor, menor é a temperatura de preaquecimento da amostra e a perda do seu material causada pela oxidação.

- Resistência térmica de contato amostra – ferramenta (*RTC*);
Define a transferência de calor da amostra para a ferramenta. Quando menor a transferência de calor através da interface, menor é o gradiente de temperatura na amostra forjada e melhor é a sua forjabilidade. As perdas térmicas através da interface amostra–ferramenta são quantitativamente as mais significativas no processo de forjamento.

O conjunto desses parâmetros define, em geral, o estado térmico da amostra forjada.

A bibliografia apresenta, normalmente, em relação aos parâmetros C_p , h , λ , ε , e H , o volume diferente daquelas necessárias para simulações numéricas do processo de forjamento. São poucas bibliografias que identificam a resistência térmica de contato amostra – ferramenta.

2.1 Terminologia utilizada nas referências científicas para denominar o fenômeno de transferência de calor através da interface amostra – ferramenta

A terminologia, atualmente utilizada na literatura para denominar o fenômeno de transferência de calor através da interface amostra – ferramenta, não está unificada. Em particular, nos trabalhos científicos [1,2,3,4,5,6,7] etc., são encontrados os seguintes termos relacionados com o fenômeno de transferência de calor através da interface amostra – ferramenta:

- Resistência térmica de contato;
- Resistência térmica da zona de contato;
- Condutividade térmica da zona de contato.
- Coeficiente de transferência de calor
(inverso à resistência térmica de contato).

O termo “Resistência Térmica de Contato” foi considerado mais conveniente e mais adequado à natureza do fenômeno de transferência de calor através da interface) do que os demais. Por esta razão este termo foi usado no trabalho apresentado.

Quanto ao termo “coeficiente de transferência de calor do material forjado para a ferramenta”, ele foi utilizado no trabalho principalmente nos casos relacionados com as referências bibliográficas citadas.

2.2 Natureza da Resistência Térmica de Contato

Quando duas superfícies condutores de calor são colocados em contato como mostrado na figura 2.2, uma resistência térmica está presente na interface desses corpos sólidos. Ela é chamada Resistência Térmica de Contato [4] e surge quando os dois materiais não são ajustados perfeitamente, aprisionando uma camada composta. O exame de uma área da zona de contato mostra que os corpos sólidos se tocam somente nos picos da superfície, e que os espaços entre eles são ocupados por um fluido, um líquido ou pelo vácuo.

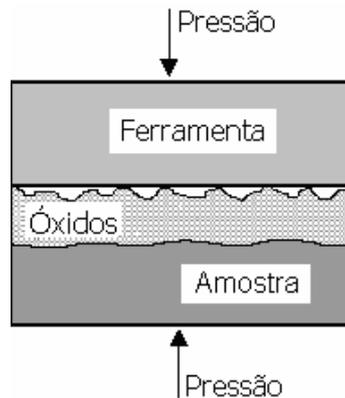


Fig. 2.2 – Modelo macroscópico da interface amostra – ferramenta.

Fonte: Li e Sellars (1996).

A transferência de calor de amostra para a ferramenta ocorre por condução, convecção e por radiação [4]. A análise das referências [3,4,6] mostra uma grande quantidade de fatores que tem a influência sobre o processo de transferência de calor através da interface. Estes fatores são as seguintes:

- Composição química de camada de óxidos;
- Espessura da camada de óxido;
- Espessura da camada de lubrificante;
- Espessura da camada do ar;
- Rugosidade das superfícies do material e da ferramenta;
- Propriedades termofísicas do material forjado e da ferramenta, da lubrificante e da camada de óxidos;
- Área de contato;
- Temperaturas da interface;
- Pressão na interface;
- Outros fatores.

Em particular, a dependência da *RTC* com a pressão é mostrada na Fig.2.3.

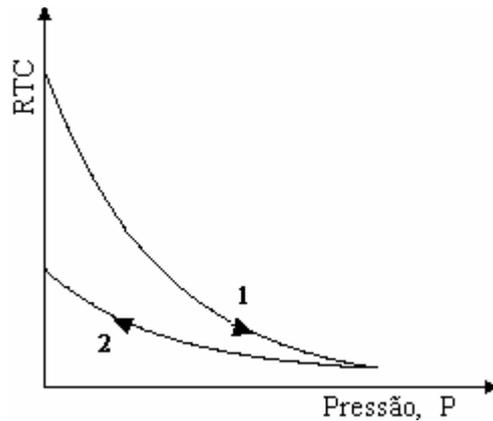


Fig. 2.3 – Representação gráfica da Resistência Térmica de Contato em função de pressão. Fonte: Li e Sellars (1996).

A curva 1 da figura 2.3 foi obtida no primeiro carregamento da interface. A curva 2 mostra a influência de desgaste da rugosidade superficial da mesma interface, que ocorre por pressão, sobre a *RTC*. A alteração das propriedades da interface é causada pela deformação plástica dos picos da superfície (fig.2.2), que ocorre durante o processo de prensagem.

A *RTC* não pode ser obtida diretamente nos experimentos [4], mas pode ser calculada [4] por

$$RTC = \frac{\Delta T}{Q_{int}} \cdot A_{int}, \quad (2.1)$$

onde:

ΔT – gradiente de temperatura na interface;

Q_{int} – taxa de calor total, transferido do material forjado para a ferramenta

A_{int} – área da interface.

A grandeza, inversa à Resistência Térmica de Contato, denomina-se coeficiente α de transferência de calor através da interface amostra–ferramenta e é apresentada [6] pela expressão:

$$\alpha = \frac{1}{RTC}. \quad (2.2)$$

A Boutonnet [7] empregou a equação, utilizada nos cálculos de transferência de calor através da interface:

$$Q_{int} = \alpha \cdot A_{int} \cdot (T_{amostra} - T_{ferramenta}), \quad (2.3)$$

onde:

$T_{amostra}$ – temperatura do material na zona de contato com a ferramenta, °C.

$T_{ferramenta}$ – temperatura da ferramenta na zona de contato com o material forjado, °C.

A equação (2.3) é válida para o caso em que os efeitos térmicos na interface, provocados pelo atrito, são desprezíveis.

2.3 Propriedades termofísicas de superfícies de corpos sólidos

As pesquisas da última década [8,9] mostram que as propriedades termofísicas superficiais de um corpo sólido são muito diferentes do que as volumétricas e dependem da localidade de camada atômica dentro do mesmo material, ou seja, dependem das vibrações dos átomos do corpo.

Esses resultados são de acordo com a teoria cinética molecular, pois as propriedades do material dependem do caráter das vibrações atômicas do mesmo [10,11], ou seja, as vibrações dos átomos dentro do corpo não são iguais aos que ficam na sua superfície e que não tem os átomos vizinhos de um lado, como é mostrado na figura 2.4.

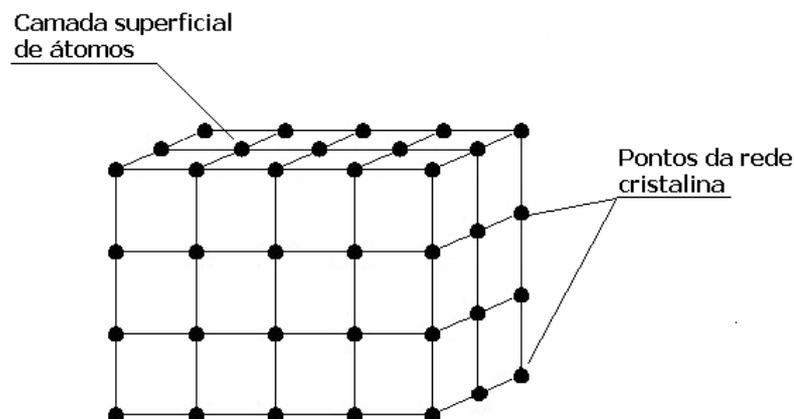


Fig. 2.4 – Esquema da estrutura cristalina de um corpo sólido.

A falta de átomos vizinhos altera drasticamente as propriedades termofísicas da superfície:

- A amplitude de vibrações de átomos superficiais (primeira camada atômica) de um cristal de ferro, medida nos experimentos, é maior em 30% por cento, e a frequência de suas vibrações é significante menor em relação aos átomos situados nos camadas posteriores. A terceira camada atômica do cristal e as posteriores não interferem na superfície [8];
- A temperatura superficial do cristal de ferro, calculada na base de dados experimentais [8], não é igual à sua temperatura volumétrica. De acordo com esses dados, a primeira (superficial) camada atômica do cristal investigado pôde ser mais quente podendo alcançar o valor de 180K em relação às camadas internas;
- A condutividade térmica superficial de metais é pelo menos duas vezes menor que a volumétrica [9];
- A dilatação térmica superficial de metais é 5–20 vezes maior que a volumétrica [9].

O salto dos valores dos parâmetros termofísicos da superfície de corpo sólido apresenta uma certa limitação na determinação da temperatura superficial do mesmo por métodos experimentais de medições indiretas de temperaturas, ou seja, atualmente não tem como determinar, com exatidão, as temperaturas na interface de corpos sólidos por cálculo ou por simulações baseadas nas temperaturas volumétricas. Somente os cálculos muito aproximados [9,12] podem ser feitos na base da teoria cinética quântica.

2.4 Métodos para determinar a Resistência Térmica de Contato

A Boutonnet apresenta na sua Tese de Doutorado [7] três classes de métodos para determinar a *RTC*:

- Métodos experimentais;
- Método misto (experimento + simulação numérica).
- Métodos teóricos.

A teoria de transferência de calor através da zona de contato de dois corpos sólidos desenvolvida é insuficiente [4]. Por esta razão, os métodos teóricos não foram considerados na presente tese.

A montagem experimental típica para determinar a *RTC* é mostrada na figura 2.5:

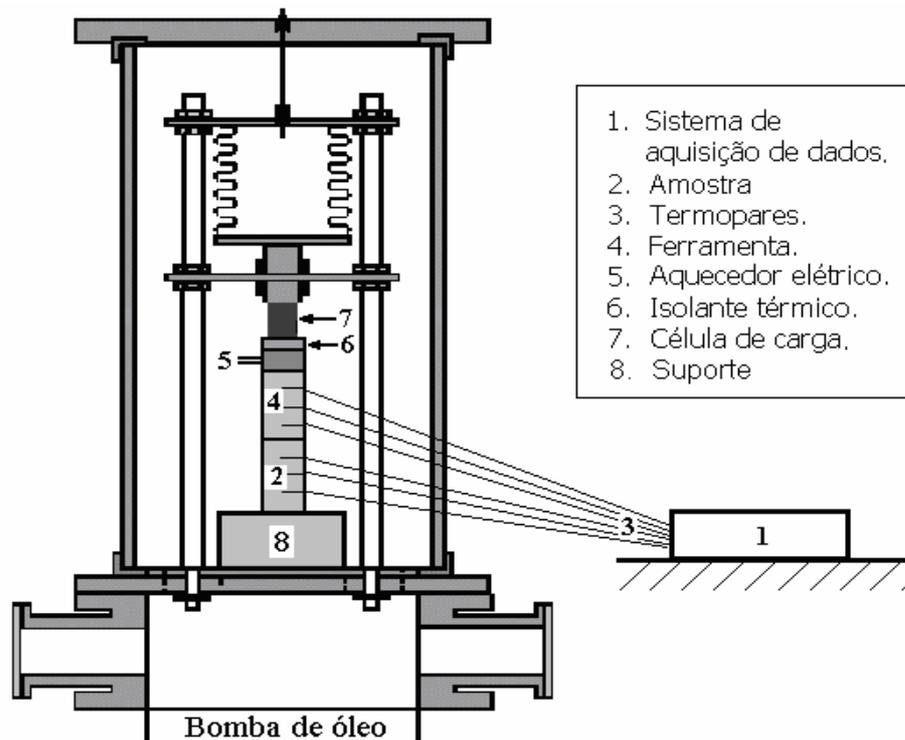


Fig. 2.5 – Montagem típica para determinar a Resistência Térmica de Contato (*RTC*).

Fonte: Boutonnet (1998).

Os elementos principais desta montagem são:

- Amostra;
- Ferramenta;
- Termopares;
- Célula de carga;
- Aquecedor;
- Isolante térmico;
- Sistema de medição e de aquisição de dados.

2.4.1 Métodos experimentais para determinar a Resistência Térmica de Contato

A análise de métodos experimentais para obtenção do valor da *RTC*, descritos na referência [7], mostra que a essência de cada um deles é a determinação das temperaturas na interface amostra–ferramenta. As abordagens conhecidas para a determinação de temperaturas superficiais são as seguintes:

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

2.4.1.1 Métodos de determinação experimental da Resistência Térmica de Contato, baseados na medição direta de temperaturas superficiais

A essência dos métodos de determinação experimental da *RTC*, baseados na medição direta de temperaturas da interface, é a medição de temperaturas do corpo nos pontos situados diretamente na sua superfície de contato ou debaixo (0,1– 0,4) mm dela. O primeiro exemplo típico desta classe de métodos é o método do Kellow et al [13].

O método do Kellow et al de determinação experimental da *RTC* é baseado na medição da temperatura da amostra num ponto situado perto da sua superfície. O esquema da medição de temperaturas é mostrado na figura 2.6:

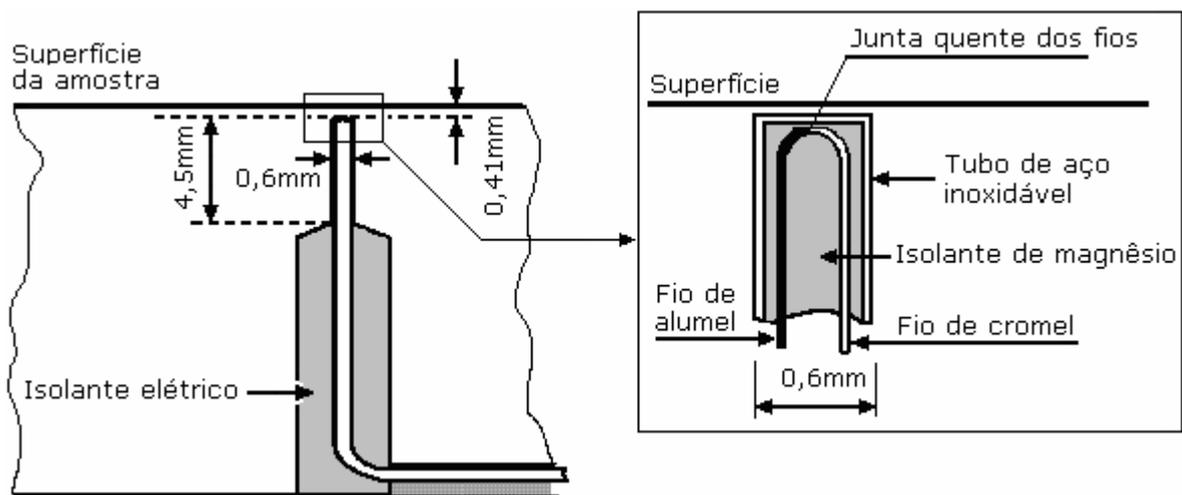


Fig. 2.6 – Esquema de medição direta de temperaturas superficiais.

Fonte: Kellow, Bramley e Bannister (1969).

Descrição do esquema do Kellow, Bramley e Bannister de medição direta de temperaturas superficiais:

- O termopar é fixado dentro da amostra.
- O ponto sensível do termopar fica perto (0,41mm) da superfície examinada.

Desvantagem do esquema do Kellow et al, de medição direta de temperaturas superficiais:

- O ponto da medição de temperaturas fica abaixo (0,41mm) da superfície examinada;
- O gradiente de temperatura entre a superfície e o ponto de medição é desconhecido;
- A amostra não deve ser deformada no experimento, senão o termopar será destruído;
- A necessidade de utilizar o equipamento especializado de usinagem.

O segundo exemplo dessa classe dos métodos de determinação experimental da *RTC*, baseados na medição direta de temperaturas superficiais, é o método do Chang e Bramley [14].

O método do Chang e Bramley de determinação experimental da *RTC* é baseado na medição da temperatura da superfície da ferramenta. O esquema de medição direta de temperaturas da superfície da ferramenta, e mostrado na figura 2.7:

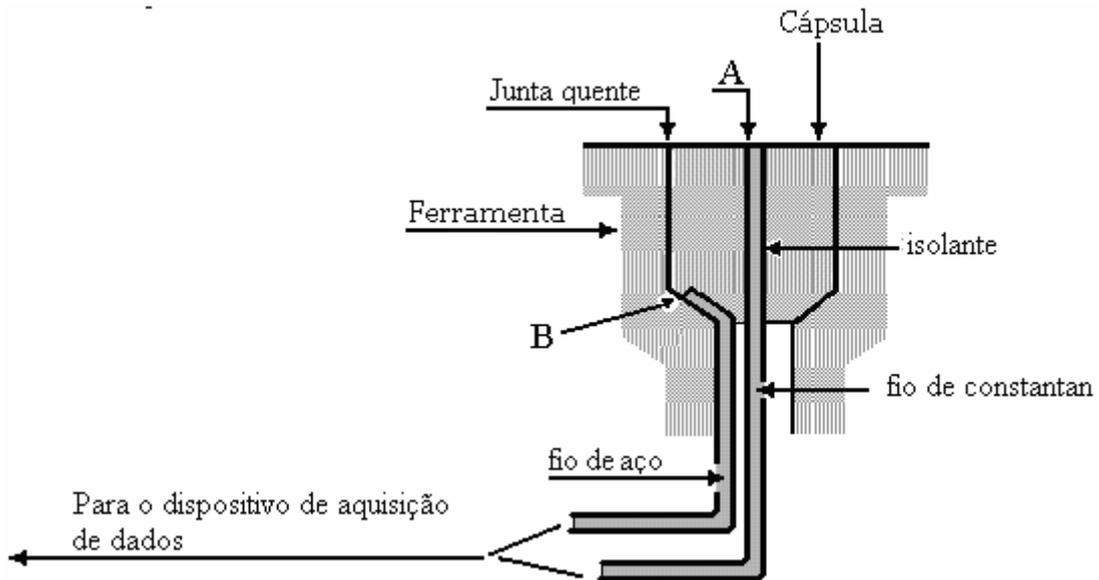


Fig. 2.7 – Esquema da medição direta de temperaturas superficiais da ferramenta.

Fonte: Chang e Bramley (2002).

A descrição do esquema mostrada na figura 2.7 é a seguinte:

- A cápsula e a ferramenta foram feitas do mesmo aço rápido;
- A montagem da cápsula na ferramenta foi feita por interferência mecânica.
- A junta quente da superfície da cápsula com a da ferramenta foi feita no processo de usinagem (retificação) da superfície deste conjunto.
- O fio de constantan tem o contato (junta quente) com o topo da cápsula no ponto “A”;
- O fio de aço tem o contato com a cápsula no ponto “B” (junta mecânica);
- O circuito termoeletrico (AB) do termopar realiza-se através do material da cápsula.
- O termopar AB foi calibrado para medir as temperaturas no ponto “A”. A calibração do termopar foi feita num forno sem contato da ferramenta com um tarugo aquecido.

O protótipo do esquema do Chang e Bramley de medição direta de temperaturas superficiais foi o esquema da ASTM mostrado na figura 2.8.

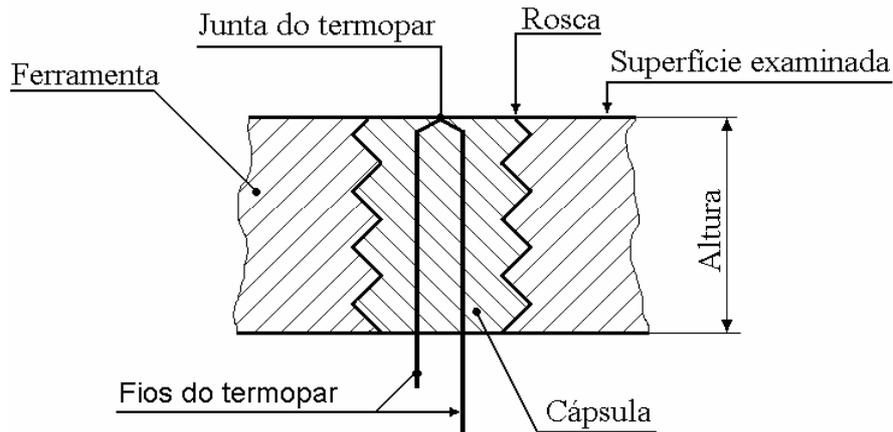


Fig. 2.8 – Montagem para medição de temperaturas superficiais, recomendada pela ASTM. Fonte: ASTM (1981).

A comparação do esquema de medição de temperaturas superficiais, recomendado pela ASTM, com o esquema do Chang e Bramley é apresentada pela tabela 2.1:

Tab. 2.1– Comparação do esquema da ASTM [15] de medição de temperaturas superficiais com o esquema do Chang e Bramley [14].

Características do esquema	ASTM	Chang e Bramley
Princípio de medição de temperatura	Medição direta da temperatura superficial da cápsula introduzida na amostra (ferramenta)	Medição direta da temperatura superficial da cápsula introduzida na amostra (ferramenta)
Aplicação do esquema	Medição de temperatura superficial de amostra	Medição de temperaturas da interface
Características da amostra	O material da amostra é igual à da cápsula.	A material da amostra é igual à da cápsula.
	A altura da cápsula é igual à da amostra	A altura da cápsula é significativamente menor à da ferramenta

A análise das figuras 2.7, 2.8 e da tabela 2.1 mostra uma grande diferença entre o esquema da ASTM medição de temperaturas superficiais e o do Chang e Bramley [14], que faz a utilização do último totalmente duvidosa. Neste sentido, o esquema do Chang e Bramley apresenta as particularidades importantes na transferência de calor através da interface amostra – ferramenta (Fig.2.9), que não foram levadas em conta pelos autores, as quais são as seguintes:

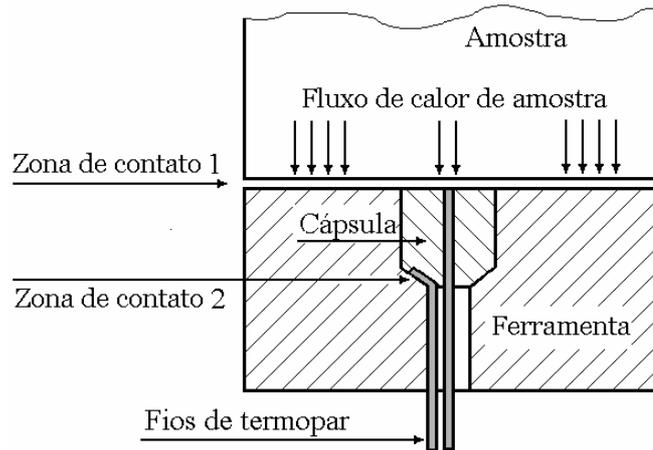


Fig. 2.9 – Esquema detalhado de fluxos de calor na montagem do Chang e Bramley (2002).

- O fluxo de calor de amostra para a ferramenta atravessa, na região da cápsula, as duas zonas de contato: zona “1” (ferramenta–cápsula) e a zona “2” (cápsula–ferramenta);
- O fluxo de calor da peça para a ferramenta atravessa, fora da região da cápsula, somente a zona de contato “1” (amostra – ferramenta).

É evidente que a resistência térmica da zona “1” é menor do que a resistência somatória das duas zonas “1” + “2”. Em consequência disso, a temperatura da cápsula (e da sua superfície) é maior do que da região vizinha da ferramenta.

De mais a mais, a utilização do esquema do Chang e Bramley não é correta no caso de contato de dois corpos sólidos–condutores da eletricidade, pois o topo do termopar (Fig.2.7, 2.9) indicará a temperatura superficial da amostra, mas não a da ferramenta. (O tópico discutido é descrito mais detalhado no item 5.2.1).

A vantagem dos métodos de determinação experimental da *RTC*, baseados na medição direta de temperaturas superficiais, é que eles podem ser utilizados tanto no regime estacionário de transferência de calor quanto transitório.

2.4.1.2 Métodos de determinação experimental da Resistência Térmica de Contato, baseados na medição indireta de temperaturas superficiais

A essência dos métodos de determinação experimental da *RTC*, baseados na medição indireta de temperaturas, é a medição de temperaturas nas regiões de amostra (ferramenta), distantes da zona de contato. Finalmente, as temperaturas da interface amostra – ferramenta calculam-se pela extrapolação dos valores de temperaturas medidas.

O esquema típico (simplificado) de medição indireta de temperaturas interfaciais, no regime estacionário de transferência de calor, é mostrado na figura 2.10.

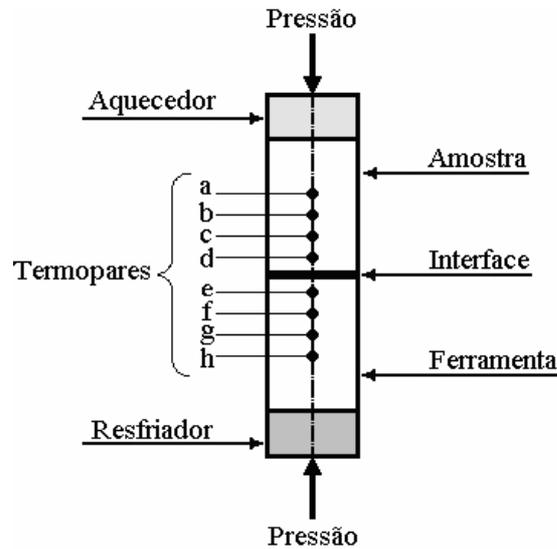


Fig. 2.10 – Esquema típico de medição indireta de temperaturas interfaciais.

Fonte: Rosochowska et al (2004).

A descrição do esquema de medição indireta de temperaturas e de determinação de temperaturas interfaciais é a seguinte:

- Os termopares a, b, c, d, e, f, g, h são fixados dentro da amostra e da ferramenta;
- Os valores de temperaturas registradas são utilizadas para construir as linhas retas de distribuição de temperaturas ao longo da amostra e da ferramenta, como é mostrado na figura 2.11.

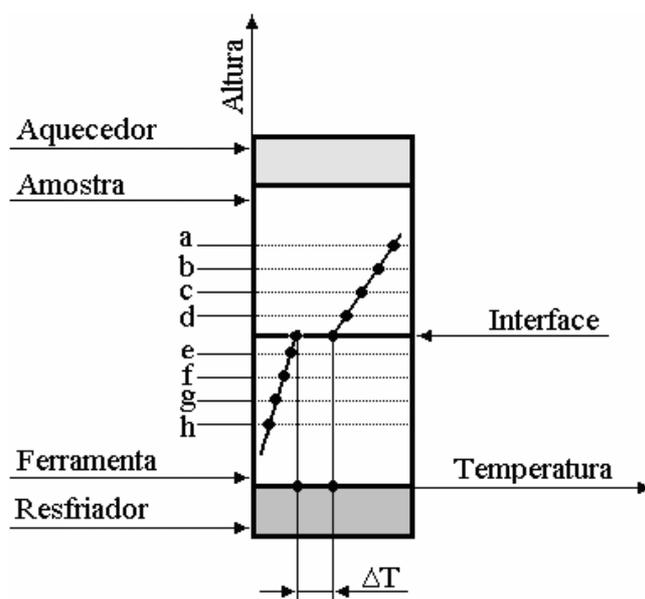


Fig. 2.11 – Distribuição de temperaturas no material da amostra (ferramenta), num regime estacionário de transferência de calor.

As desvantagens da medição indireta de temperaturas superficiais são as seguintes:

- As temperaturas da interface amostra – ferramenta, calculadas pela extrapolação dos valores de temperaturas medidas, serão corretas somente para o regime estacionário de transferência de calor de amostra para a ferramenta.
- A necessidade de manter constante a diferença grande (centenas de graus Celsius) de temperaturas entre a amostra e a ferramenta, o que é característico para o processo de forjamento a quente.

Um exemplo, o mais recente, desta classe de métodos é o método da Rosochowska et al [16].

O método da Rosochowska et al, de determinação experimental da *RTC* é baseado na medição de temperaturas de ferramenta nos pontos situados distante da interface. O esquema da medição de temperaturas na montagem experimental da Rosochowska et al, é mostrado na figura 2.12:

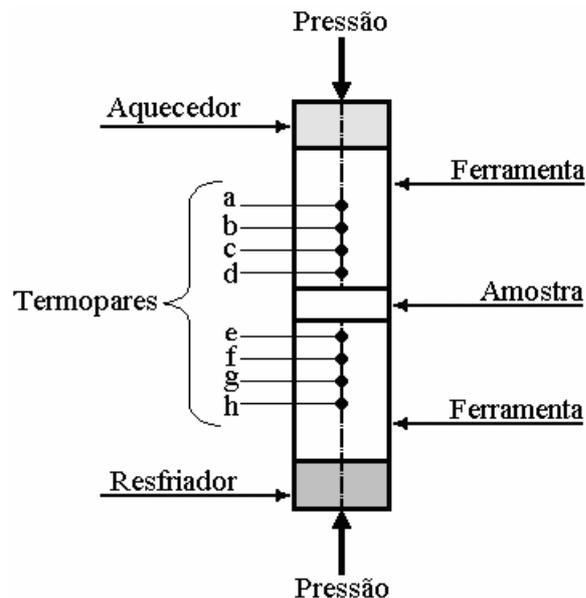


Fig. 2.12 – Esquema da medição indireta de temperaturas.

Fonte: Rosochowska et al (2004).

A descrição reduzida da montagem da Rosochowska et al., para determinação experimental da *RTC*, experimental é a seguinte:

- A amostra de aço Ma8 para o forjamento a frio foi colocada entre duas matrizes de aço N1019. As faces da amostra foram polidas. As dimensões da amostra foram de Ø18 x 2mm.

- A ferramenta (matriz) superior foi aquecida e a temperatura do topo dela foi mantida constante por um aquecedor elétrico. A superfície lateral dessa matriz foi coberta por um isolamento térmico.
- A ferramenta (matriz) inferior foi resfriada e a temperatura da base dela foi mantida constante pelo um resfriador da água fria. A superfície lateral dessa matriz também foi coberta pelo isolamento térmico.
- A temperatura da amostra não foi controlada.

As designações de materiais usados na montagem da Rosochowska et al é dada conforme referência [16].

A montagem de Rosochowska et al. manteve o estado estacionário de transferência de calor através do sistema matriz–amostra–matriz para o meio ambiente. As temperaturas das matrizes foram registradas pelos 8 termopares (a, b, c, d, e, f, g, h). A pressão aplicada para a amostra foi de 10 MPa.

A desvantagem do método de Rosochowska et al. é relacionada com o modelo físico incorreto de processo de transferência de calor e é a seguinte:

O método da Rosochowska et al. é baseado na admissão de caráter escalar da *RTC* . Na verdade, a *RTC* é uma grandeza vetorial, ou seja, a resistência térmica da interface depende da direção do fluxo de calor transferido de um sólido para outro. (Conforme as referências [17,18] o valor da *RTC* pode variar significante em função da direção do fluxo de calor). Portanto os cálculos da Rosochowska et al. são incorretos. (Quanto ao método em si, ele é válido somente para o caso em que os materiais da amostra e da ferramenta são iguais).

A desvantagem da montagem da Rosochowska et al. é relacionada com as temperaturas do experimento relativamente baixas, ou seja, a temperatura média da amostra não ultrapassa 87°C.

2.4.2 Método misto para determinar a Resistência Térmica de Contato

A essência do método misto para determinar a *RTC* consiste na comparação das curvas experimentais de resfriamento de amostra com as curvas teóricas de resfriamento da mesma, calculadas para os valores arbitrários da *RTC*. Quanto ao valor da *RTC* procurado, ele corresponde a uma das curvas teóricas, obtidas na simulação do resfriamento da amostra, que mais se aproxima da curva experimental.

O exemplo típico do método misto para determinar o coeficiente α , que tem o valor recíproco quando comparado com a *RTC*, é mostrado na obra do Caliskanoglu et al [19].

Descrição do método misto de determinação do coeficiente α , desenvolvido por Caliskanoglu et al

- A amostra de aço 100Cr6 de $\varnothing 100 \times 30 \text{ mm}$ foi aquecida até 1000°C no forno, foi colocada sobre uma placa de cerâmica aquecida à mesma temperatura, e foi levada para a prensa hidráulica. O conjunto foi colocado entre as matrizes de aço X38CrMoV5–3 aquecidas até 200°C ;
 - O fluxo de calor através da interface amostra – matriz foi transitório;
 - A força aplicada para a amostra foi de [0; 2,55; 6,37 e 15,28] MPa. As temperaturas da amostra e matrizes foram registradas pelos 5 termopares;
- As temperaturas da amostra resfriada foram registradas no centro e no topo da mesma. As curvas experimentais de resfriamento da amostra de aço foram calculadas manualmente;
- As curvas simuladas de resfriamento da amostra de aço foram obtidas pelo software ABAQUS para os valores arbitrários de α .

As designações de materiais usados na montagem do Caliskanoglu et al, são dadas conforme referência [19].

A comparação das curvas simuladas e experimentais de resfriamento da amostra de aço 100Cr6, são mostradas na figura 2.13.

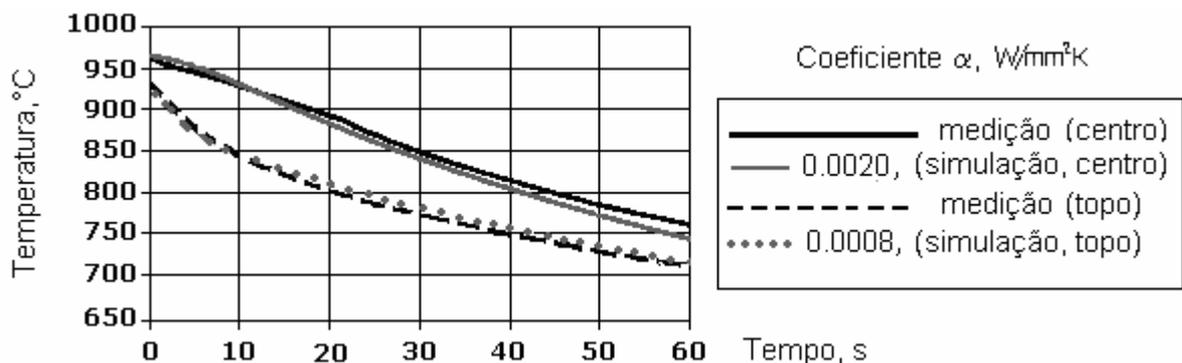


Fig. 2.13 – Curvas experimentais e as curvas simuladas do resfriamento da amostra de aço 100Cr6. Fonte: Caliskanoglu et al (2002).

O valor de α obtido na simulação do resfriamento do centro da amostra de aço 100Cr6 foi o seguinte:

$$\alpha = \frac{1}{RTC} = 0,0020 \left[\frac{W}{mm^2 \cdot ^\circ C} \right].$$

Porém, na simulação feita para o topo da amostra de aço 100Cr6, o resultado obtido foi bem diferente como pode ser visto abaixo:

$$\alpha = \frac{1}{RTC} = 0,0008 \left[\frac{W}{mm^2 \cdot ^\circ C} \right].$$

É evidente que os resultados da simulação do resfriamento da amostra são contraditórios, pois a interface amostra–matriz não pode possuir dois valores diferentes de α . Portanto, os valores diferentes de α obtidos na simulação podem estar relacionados tanto aos erros dos experimentadores, como às desvantagens do método misto.

A vantagem do método misto para determinar a RTC é a facilidade de obtenção e comparação das curvas de resfriamento da amostra.

As desvantagens do método misto para determinar a RTC são as seguintes:

- Os programas atuais de simulação do estado térmico de amostra não mostram a margem de erro dos seus cálculos. A utilidade, na engenharia aplicada, dos valores sem margem de erro é muito limitada.

A pesquisa para determinar essa margem requer os esforços enormes. Um bom exemplo de tais esforços foi descrito na literatura [20]: os autores daquela obra fizeram cerca de 3000 simulações para se saber a incerteza de cálculos de um programa de simulação comercial.

- Os programas de simulação do estado térmico de amostra requerem as condições iniciais de resfriamento da mesma, determinadas com exatidão [1]. Por isso, o campo de temperaturas da amostra deve estar homogêneo no início do experimento, ou seja, no momento da aplicação de força.

Infelizmente, as técnicas para manter o campo homogêneo de temperaturas até a aplicação de força não são desenvolvidas e mencionadas nas referências. Essa desvantagem pode ser observada, em particular, pela figura 2.13.

2.4.3 Artigos mais recentes relacionados com a determinação da Resistência Térmica de Contato

A pesquisa de publicações mais recentes na área de forjamento a quente foi feita com base nas referenciais disponibilizadas pelo portal da Capes. Foram analisadas cerca de 150 publicações relacionadas com a determinação da *RTC*. O resumo de melhores trabalhos analisados é mostrado na tabela 2.2.

Tab. 2.2 – Métodos de obtenção da Resistência Térmica de Contato (*RTC*) mostrados nos artigos mais recentes.

Ano de publicação	n°	Método de obtenção da <i>RTC</i>	Ref.
2004	1	Experimental	[15]
	2	Simulação	[21]
2005	3	Simulação	[22]
	4	Simulação	[23]
	5	Simulação	[24–25]
2006	6	Cálculos	[26]
	7	Experimento + simulação	[27]
	8	Experimento + simulação	[28–30]
2008	10	Experimento + cálculo aproximado	[31]
2008	9	Análise de fluxos de calor característicos para o forjamento a quente	[3]

A análise dos trabalhos apresentados na tabela 2.2 revelou os seguintes fatos:

- As pesquisas baseadas nas simulações numéricas [21–30] são de pouca utilidade por falta de informações (metodologia de trabalho, base de dados utilizada, etc.);
- A pesquisa baseada no cálculo aproximado [31] também é de pouca utilidade por falta de margem de erro do resultado;
- O único trabalho experimental [15] baseia-se na suposição incorreta (v. item 2.3.1.2);
- Quanto ao trabalho [3], ele define a faixa de valores da *RTC*, típicos para o forjamento a quente, mas não apresenta nenhum método de determinação da *RTC*.

2.5 Valores da Resistência Térmica de Contato, citadas na literatura

Nas últimas décadas foram efetuadas inúmeras medições da Resistência Térmica de Contato entre superfícies metálicas diferentes [4]. Parte dessas medições, relacionada com o forjamento, é mostrada na tabela 2.3, na forma de valores da *RTC*.

Tab. 2.3 – Valores da Resistência Térmica de Contato, apresentados nas referências.

<i>RTC</i>	Amostra		Ferramenta		Ref.
	Temperatura	Material	Temperatura	Material	
m^2K/W	°C	–	°C	–	–
222 – 404	920	Titânio	20–800	Aço	[32]
29,8 – 227,3	900	Titânio	550	Aço	[3]
20	200	Alumínio	–	Aço	[33]
69	273	Alumínio	206	Aço	[31]
$\geq 29,8$	500	Alumínio	200	Aço	[3]
25 – 370,4	87	Aço	200	Aço	[16]
10 – 50	<200	Aço	200	Aço	[34]
10 – 50	<300	Aço	300	Aço	[34]
166,7 – 170	425	Aço	195	Aço	[35]
128,4 – 2531,6	910	Aço	250	Aço	[14]
166,7 – 1250	950	Aço	200	Aço	[19]
133,3 – 333,3	1100	Aço	–	Aço	[1]
142,9 – 166,7	1000	Aço	200	Aço	[19]
1538	1150	Aço	200	Aço	[36]
$\leq 645,2$	1200	Aço	200	Aço	[3]

Os materiais da amostra e da ferramenta são apresentados na tabela 2.3 na forma generalizada.

Os valores mínimos da *RTC* são típicos para o forjamento de ligas de alumínio, e os máximos são típicos para o forjamento de aços [3].

A maioria de valores da *RTC*, mostrados nas bibliografias e relacionada com o forjamento, fica na faixa de [20 – 2532] $\frac{m^2 \cdot K}{W}$.

2.6 Incerteza da Resistência Térmica de Contato, mostrada na literatura

A incerteza dos valores da Resistência Térmica de Contato, obtidos experimentalmente, fica na faixa de 23,5 a 33% para a *RTC* relativamente pequena e de 5 a 5,5% para a *RTC* relativamente grande [16,33].

A incerteza dos valores da Resistência Térmica de Contato calculados [26], obtidos pelas simulações [21–25] e por método misto [1,14,19,27–31] não é mostrada nas referências.

2.7 Resumo dos métodos para determinar a Resistência Térmica de Contato

A análise dos trabalhos apresentados neste capítulo revelou problemas sérios relacionados com a investigação da zona de contato de corpos sólidos. Estes problemas são os seguintes:

1. A instrumentação para investigar o estado térmico da interface amostra – ferramenta de forjamento não é eficiente. Por isso, as pesquisas mais recentes tendem a negar a experimentação e dar preferência às simulações numéricas na base de dados duvidosos [3].
2. Apesar de grande quantidade de medições da *RTC* entre superfícies metálicas, feitas nas últimas décadas, não foi encontrada nenhuma correlação satisfatória entre os resultados obtidos [4]. Portanto, cada situação descrita nas referências bibliográficas deve ser tratada separadamente e tem utilidade muito limitada.

Quanto aos resultados de confiança na determinação da *RTC*, atualmente são aqueles que não utilizam a instrumentação inadequada e que não são baseados numa simulação. De acordo com este raciocínio, os valores da *RTC*, obtidos por Polozine e Schaeffer (2008) [3] e apresentados na tabela 2.3, podem ser considerados confiáveis. Estes valores foram calculados pela Lei de Conservação de Energia térmica com base em dados numéricos sobre a transferência de calor nos processos de forjamento a quente, coletados e generalizados pelo instituto IBF [1].

Capítulo 3 – Modelo Físico do Processo de Transferência de Calor de Amostra para a Ferramenta

A literatura [4] mostra a impossibilidade de medir diretamente a Resistência Térmica de Contato. Apesar disso, a *RTC* pode ser determinada na base de dados experimentais tratados por métodos matemáticos. A equação (2.1) para os cálculos da *RTC* é mostrada no capítulo “Estado da Arte”.

Os dados para efetuar os cálculos da *RTC* são os parâmetros e as variáveis do experimento adequado ao processo de transferência de calor descrito pela equação mencionada. O modelo físico do processo de transferência de calor, adequado à equação (2.1), é mostrado na Fig.3.1.

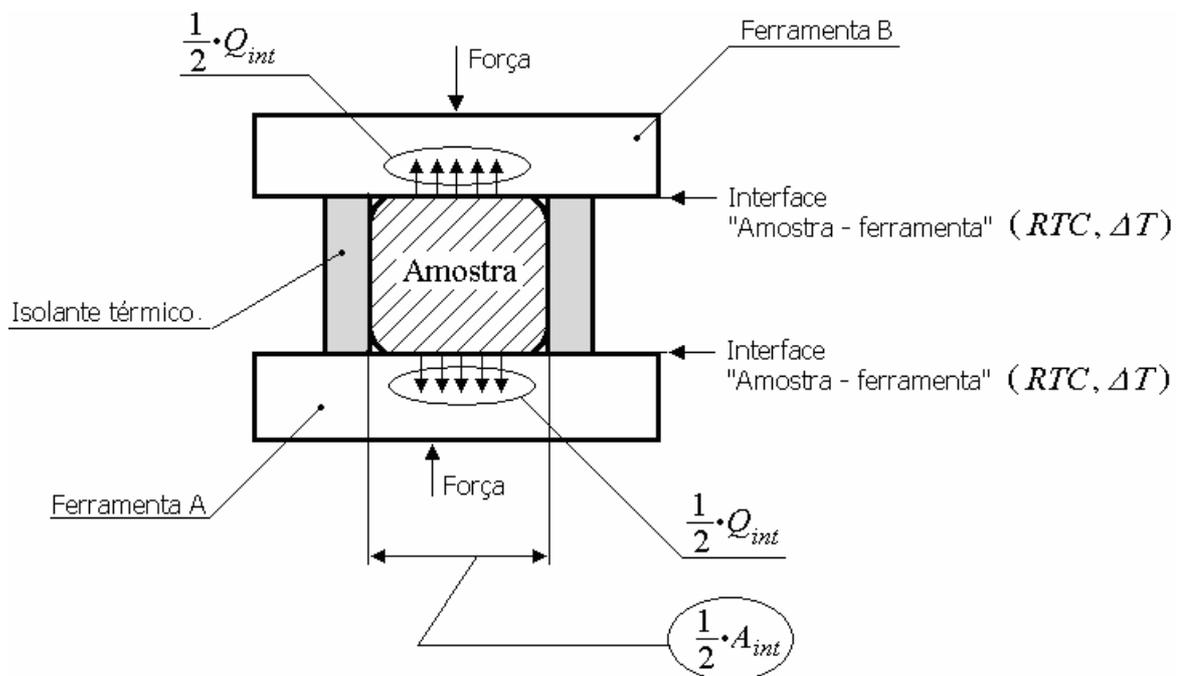


Fig. 3.1 – Representação esquemática do modelo físico do processo de transferência de calor de amostra para a ferramenta.

Descrição do modelo físico:

a). Elementos do modelo físico:

Isolante térmico.

Amostra de metal;

Ferramenta de forjamento. A ferramenta de forjamento é representada pelas duas matrizes (A, B) de aço;

As matrizes superior e inferior são do mesmo material, do tamanho e da forma.

b). **Características geométricas do modelo físico:**

As duas áreas de contato da amostra com a ferramenta são iguais a $0,5 \cdot A_{int}$;

A área total de contato é igual a A_{int} .

c). **Características térmicas do modelo físico:**

A temperatura da amostra é maior do que a das ferramentas;

As temperaturas iniciais das ferramentas A e B são iguais;

As temperaturas da amostra e do isolante térmico são iguais;

Os gradientes de temperatura nas interfaces amostra–ferramenta são iguais a ΔT ;

O calor flui da amostra aquecida para a ferramenta relativamente fria;

O fluxo de calor transferido da amostra para a ferramenta é transiente;

O fluxo de calor transferido da amostra para a ferramenta é unidirecional;

A taxa de calor, transferido da amostra para a ferramenta A, é igual a $0,5 \cdot Q_{int}$;

A taxa de calor, transferido da amostra para a ferramenta B, é igual a $0,5 \cdot Q_{int}$.

A taxa de calor total transferido da amostra para a ferramenta é igual a Q_{int} ;

O fluxo de calor transferido através da interface “amostra–isolante térmico” é desprezível*.

A energia interna do material da amostra é a soma da energia térmica transferida no tarugo por aquecimento prévio, mais a energia liberada no material pela transformação de fases e mais o trabalho de compressão do mesmo.

*Observação:

O isolante térmico é destinado para diminuir as perdas de calor da amostra para o meio ambiente e para fazer o fluxo de calor unidirecional. Isso simplifica significativamente os cálculos posteriores da *RTC*.

Capítulo 4 – Modelo Matemático do Processo de Transferência de Calor de Amostra para a Ferramenta

A equação (2.1) para os cálculos de resistência térmica da zona de contato amostra – ferramenta foi mencionada no capítulo “Estado da Arte”. Essa equação é a seguinte:

$$RTC = \frac{\Delta T}{Q_{int}} \cdot A_{int}.$$

Obtenção das variáveis e parâmetros da equação (2.1)

A análise da equação (2.1) mostra que os seus membros A_{int} e ΔT podem ser determinados (medidas) diretamente num experimento adequado ao modelo físico do processo de forjamento, descrito no capítulo 3.

No que se refere à taxa de calor total, Q_{int} calcula-se com base na soma de três tipos de calor de natureza diferente:

- Calor sensível transferido para o material forjado por seu aquecimento prévio;
- Calor latente de transformação de fase, fornecido no material forjado;
- Calor gerado no material forjado pela sua deformação plástica,

ou seja:

$$Q_{int} = \frac{C_{int}}{dt}; \quad (4.1)$$

e

$$C_{int} = C_{sensível} + C_{fase} + C_{deformação}. \quad (4.2)$$

O calor sensível calcula-se pela seguinte equação:

$$C_{sensível} = m \cdot C_p \cdot dT_m, \quad (4.3)$$

onde:

m – massa da amostra;

C_p – calor específico do material da amostra;

dT_m – alteração da temperatura média da amostra por seu resfriamento;

t – tempo de resfriamento da amostra;

O calor, fornecido no material forjado pela transformação de fases, calcula-se pela equação (4.4) que é semelhante à equação (4.3):

$$C_{fase} = m_a \cdot C_p \cdot d(\Delta T_f), \quad (4.4)$$

onde:

m_a – massa da região (da amostra) afetada pela transformação de fases;

$d(\Delta T_f)$ – alteração da temperatura média da amostra por energia liberada pela transformação de fases.

O calor, gerado no material pela sua deformação plástica, é igual ao trabalho de compressão da amostra, por unidade de tempo, e calcula-se pela seguinte equação:

$$C_{deformação} = F \cdot dh, \quad (4.5)$$

onde:

F – força de deformação;

dh – deformação absoluta da amostra forjada;

A expressão matemática para o cálculo da taxa de calor total $Q_{interface}$ é deduzida das equações (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) e (4.5):

$$Q_{int} = m \cdot C_p \cdot \frac{dT_m}{dt} + m_a \cdot C_p \cdot \frac{d(\Delta T_f)}{dt} + F \frac{dh}{dt}. \quad (4.6)$$

Obtenção das variáveis e dos parâmetros da equação (4.6)

A análise da equação (4.6) mostra que os seus membros F , m , C_p , h e t podem ser determinados (medidos) diretamente num experimento adequado ao modelo físico.

Quanto à variável T_m (temperatura média da amostra, relacionada com o calor sensível do seu material.), ela não pode ser medida diretamente, pois as temperaturas dentro do tarugo resfriado são diferentes. A distribuição de temperaturas dentro da amostra é representada graficamente pela figura 4.1.

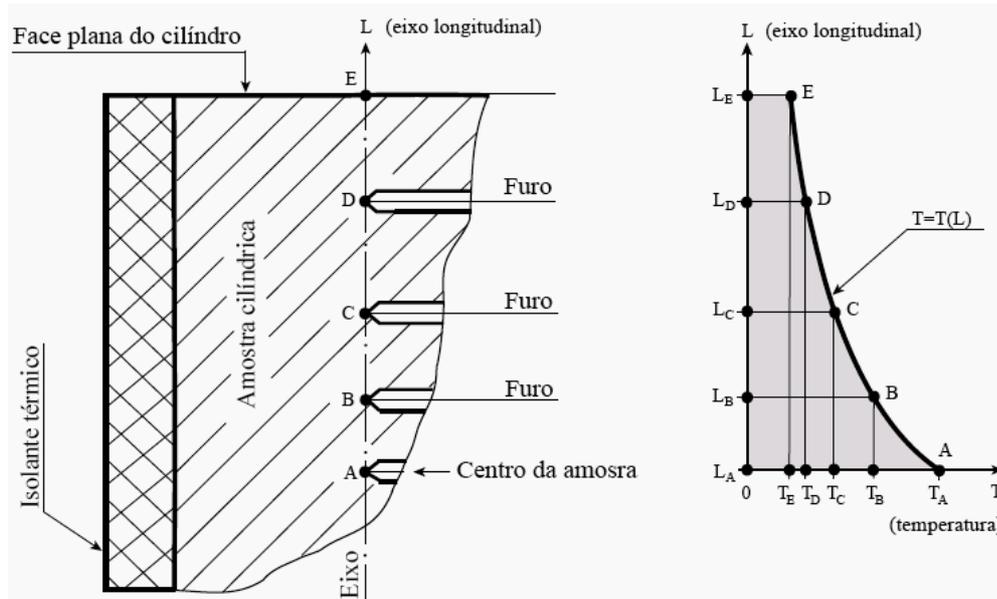


Fig. 4.1 – Distribuição de temperaturas no material da amostra forjada.

De acordo com o modelo físico mostrado na figura 3.1, o fluxo de calor da amostra para a ferramenta é unidirecional, ou seja, o calor flui na direção longitudinal do cilindro e não flui na direção radial do mesmo.

A temperatura T ao longo da direção radial é a mesma em todos os pontos e corresponde à temperatura num ponto no eixo “L” longitudinal.

A temperatura T ao longo da direção longitudinal não é homogênea:

- A temperatura máxima do tarugo corresponde ao ponto A no seu centro.
- A temperatura mínima do tarugo corresponde ao ponto E na sua face.

A distribuição de temperaturas T em função da distância L do centro da amostra pode ser representada analiticamente na forma de função $T=T(L)$.

A temperatura média da amostra pode ser calculada por integração numérica das temperaturas medidas nos pontos diferentes do cilindro. O cálculo baseia-se nas coordenadas L de pontos (A, B, C, D, E) de medição de temperaturas e nas curvas de resfriamento do mesmo gravadas nos pontos mencionados. O valor da temperatura média da amostra é igual à área da figura $AL_A L_E EDCBA$, dividida por sua base $L_A L_E$, ou seja:

$$T_m = \frac{\int_{L_A}^{L_E} T(L) \cdot dL}{L_E - L_A} . \quad (4.7)$$

Quanto à taxa de perda, por resfriamento, de calor sensível da amostra, ela é definida como a primeira derivada da função $T_m(t)$ em relação a variável t . O método de obtenção da derivada é baseado na elaboração da curva de resfriamento em temperaturas T_m (médias) da amostra, relacionadas com o calor sensível do seu material. O procedimento detalhado de elaboração da curva é descrito nas referências bibliográficas [37] e [38].

O desenho esquemático da curva de resfriamento da amostra forjada, e suas características analíticas que são necessárias para os cálculos da derivada, são mostradas na figura 4.2.

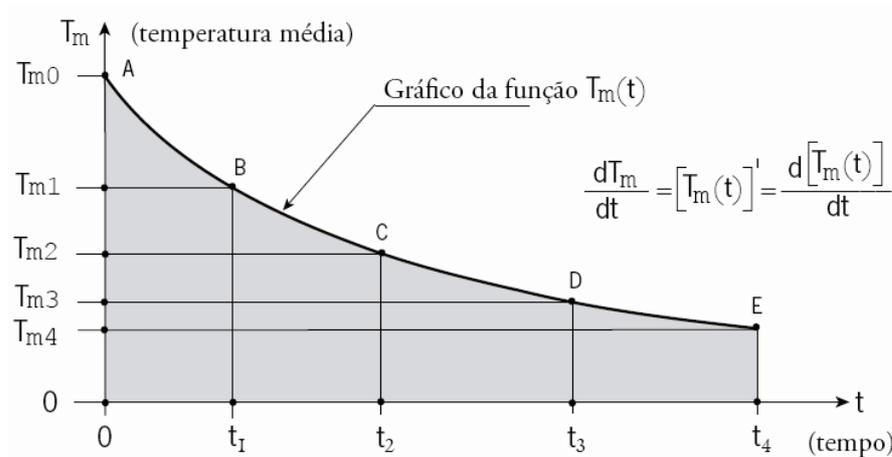


Fig. 4.2 – Características analíticas da curva de resfriamento da amostra forjada.

A equação para calcular a variável $\frac{dT_m}{dt}$ é a seguinte:

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{d[T_m(t)]}{dt} \quad (4.8)$$

Quanto às variáveis m_a e ΔT_f , elas não podem ser medidas diretamente. Mas estas variáveis podem ser avaliadas numericamente pela análise quantitativa de curvas de resfriamento da amostra.

Equação final para os cálculos da Resistência Térmica de Contato

Substituindo na equação (2.1) a variável Q_{int} por expressões (4.6), (4.7) e (4.8), obtém-se a equação básica para calcular a RTC:

$$RTC = \frac{\Delta T \cdot A_{int}}{m \cdot C_p \cdot \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\int_{L_A}^{L_E} T(L) \cdot dL}{L_E - L_A} \right) (t) \right] + m_a \cdot C_p \cdot \frac{d(\Delta T_f)}{dt} + F \cdot \frac{dh}{dt}} \quad (4.9)$$

Capítulo 7 – Conclusões e Comentários Finais

De acordo com o objetivo da presente tese, neste trabalho foi desenvolvida uma efetiva e relativamente barata técnica analítica para determinar a Resistência Térmica de Contato material forjado – ferramenta. Esta técnica é adequada às condições de altas e moderadas temperatura e pressão muito grande, o que é característico do processo de forjamento.

A análise detalhada dos resultados apresentados nesta tese permite tirar as seguintes conclusões:

1. A nova técnica analítica para determinar a Resistência Térmica de Contato é adequada à pressão alta e temperatura elevada na interface peça – ferramenta;
2. A técnica desenvolvida foi testada com sucesso para os materiais típicos (aço ABNT 1045, liga de alumínio AA6351e liga de titânio Ti6Al4V) utilizados no forjamento a quente;
3. Os valores da Resistência Térmica de Contato, obtidos nos experimentos, são recomendados para uso em programas de simulação computacional do comportamento do material forjado;
4. A nova técnica para determinar a Resistência Térmica de Contato consiste no (i) novo método de medição de temperaturas superficiais e (ii) nova técnica para determinar a temperatura superficial de amostra metálica.
5. O novo método de medição de temperaturas superficiais foi testado com sucesso. Este método pode ser aplicado tanto na determinação da Resistência Térmica de Contato, como na termometria em geral. O método desenvolvido foi publicado em revista internacional [39];
6. A nova técnica para determinar a temperatura superficial de amostra metálica foi testada com sucesso. Esta técnica pode ser aplicada tanto na engenharia experimental como na ciência de superfícies de corpos metálicos.

7.1 Comentários finais

As amostras usadas na determinação experimental da Resistência Térmica de Contato foram de tamanho e de massa relativamente grande, o que resultou em taxa lenta de resfriamento do material testado. Devido à lentidão do resfriamento das amostras, os

experimentos passaram a ser feitos sem pressa, uma etapa por outra, e foram realizados por uma mesma pessoa.

Na prática, a massa da amostra pode ser menor e o seu resfriamento mais rápido do que nos experimentos realizados na presente tese. Em consequência disso, a execução do experimento será limitada por tempo e o experimentador deverá atuar com muita rapidez. Mesmo assim, ele pode fracassar.

No futuro, para eliminar os problemas relacionados com o resfriamento rápido do material testado, algumas etapas do experimento devem ser realizadas simultaneamente, ou seja, o trabalho experimental com as amostras pequenas requer um equipe de técnicos bem preparados.

REFERÊNCIAS

- 1 KOPP R., PHILLIP F–D. Physical parameters and boundary conditions for the numerical simulation of hot forming processes. **Steel research**, Dusseldorf, 1992. Verlag Stahlesisen, v. 63, n. 9, p. 394.
- 2 ALTAN, Taylan, OH, Soo–Ik, GEGEL, H. L. **Conformação de metais: fundamentos e aplicações**. 1.ed. São Carlos: Editora da UFSCAR, 1999. 350 p.
- 3 POLOZINE, A., SCHAEFFER, L. Influence of the inaccuracy of thermal contact conductance coefficient on the weighted-mean temperature calculated for a forged blank. **Journal of Materials Processing Technology**, [Atlanta GA], jan. 2008, Elsevier, n. 195, p. 260-266.
- 4 KREITH Frank., BOHNT Mark .S. **Princípios de transferência de calor**. 1.ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 623 p.
- 5 LI Y.H., SELLARS C.M. Evaluation of interfacial heat transfer and its effects on hot forming processes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELLING OF METAL ROLLING PROCESSES n.2, 12., 1996, London. Ironmaking and Steelmaking, v.23, n.1, p. 52–91.
- 6 BARDON, J.P., et al. Bilan des principales recherches sur les résistances thermiques de Contact. **Rapport DETB 7101. Institut de Physique, Univ. de Nantes**, Nantes, 1971. Institut de Physique, Univ. de Nantes. (em francês).
- 7 BOUTONNET A.S. **Etude de resistance thermique de contact a l’interface de solides de deformables en frottement: application aux procedes de forgeage**. Lyon, 1998. Tese de doutorado - L’institut National des Sciencec Applliques de Lyon. (em francês). Disponível em: <<http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?&id=marchand&/these/1998/marchand/index.html>>. Acesso em: 28 jan. 2009.
- 8 SLEZA T., et. al. Phonons at the Fe(110) Surface. Physical Review Letters. **The American Physical Society**, PRL 99, 066103, 2007. Disponível em: <<http://scitation.aip.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=PRLTAO000099000006066103000001&idtype=cvips&gifs=yes>>. Acesso em: 3 dez. 2007.
- 9 KICELEV V.F., KOZLOV S.N., ZOTOV A.B. **Fundamentos da física da superfície de corpo sólido**. Moscou: Imprensa MGU, 1999. 284 p. (em russo).
- 10 CIVUCHIN, D.V. **Curso geral de física. Termodinâmica e física molecular**. Moscou: Nauca, 1973. 551 p. (em russo).
- 11 BAGNATO V.S., RODRIGUES V. Análogo mecânico para condutividade elétrica dos metais: Efeito da temperatura. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. São Paulo,

- jan/mar. 2006, v.28, n.1, p. 35-39. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v28_35.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2007.
- 12 VLASOV A. D. Evidence that the effective temperature of crystal surfaces is of real nature. **Crystal research and technology**. 1995, Wiley Interscience, v.30, n.5, p. 685-690. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/abstract/112451029/ABSTRACT?CRETRY=1&SRETRY=0>>. Acesso em: 20 jun. 2007.
 - 13 KELLOW, M.A., BRAMLEI, A.N., BANNISTER, F.K. The measurement of temperatures in forging dies. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [Atlanta GA], 1969, Elsevier, v.9, p. 239–260.
 - 14 CHANG C. C., BRAMLEY A. N. Determination of the heat transfer coefficient at the work piece-interface for the forging process. **Part. B-Journal of Engineering Manufacture**, Westminster, 2002, Professional Engineering Publishing Ltd, v.216, n.8, p.1179-1186.
 - 15 American Society for the Testing of Materials. **Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement. STP 470B**. Philadelphia: ASTM, 1981. 252 p.
 - 16 M. ROSOCHOWSKA, K. CHODNIKIEWICZ, R. BALENDRA. A new method of measuring thermal contact conductance. **Journal of Materials Processing Technology**, [Atlanta GA], jan. 2004, Elsevier, n. 145, p. 212–213.
 - 17 FLETCHER L.S. Recent Developments in Contact Conductance Heat Transfer. **Journal of Heat Transfer**, [Atlanta GA], 1988, Elsevier, n. 110, p. 1059–1070.
 - 18 O'CALLAGHAN P.W., PROBERT S.D., JONES A. A.. Thermal rectifier. **Journal of Physics D – Applied Physics**, Bristol, 1970, [s.n.], v.3, p. 1352 -1358. Disponível em: <<http://www.iop.org/EJ/article/0022-3727/3/9/316/jdv3i9p1352.pdf?request-id=ffdfcfb9-3dd0-431d-9a6b-07990e59cac4>>. Acesso em: 26 ago. 2008.
 - 19 CALISKANOGLU D., et.al. Influence of heat transfer coefficient on the temperature stress of hot forming tools. Friction and Wear in Metalforming. In: METALFORMING. EUROMECH 435, 2002, Valenciens, 2002.
 - 20 ZÁDOR, J., ZSÉLY I, G.Y., TURÁNYI, T. **Local and Global Uncertainty Analysis of Complex Chemical Kinetic Systems**. Budapest, 2006, Department of Physical Chemistry, Eötvös University. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4T-4J0WRB5-4&_user=687304&_rdoc=1&_fmt=&_orig=search&_sort=d&view=c&_version=1&_urlVersion=0&_userid=687304&md5=1c4f8ecd2004533726ca7e59a9862579>. Acesso em: 25 dez. 2007.
 - 21 WILLIAM, R.D.W, STEVEN, R. SCH., JIYING, L. Advanced simulations for hot

- forging: heat transfer model for use with the finite element method. **Journal of Materials Processing Technology**, [Atlanta GA], nov. 2004, Elsevier, n. 155–156, p.1912–1917.
- 22 SHIRGAOKAR, M., NGAILE, G., SHEN, G. Process modeling in impression-die forging using finite-element analysis. **ASTM International**. Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications (#05104G). [Hitchin], 2005, American Technical Publishers Ltd., p. 1-9. Disponível em: <http://hts.asminternational.org/content/ASM/StoreFiles/05104G_Chapter16_WEB.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2008.
- 23 GUIDO, B. B., MONTI, M., SALMASO, L. In the heat of the furnace-investigate the effect of oxide scale on hot forging. In: ENBIS6 – WROCLAW CONFERENCE, ENBIS Elections 2005, 2006, Wroclaw. p.3. Disponível em: <<http://www.enbis.org/newsletter/SCWjul05Enbis.pdf>>. Acesso em: 7 jun. 2007.
- 24 BEHRENS, B.-A., SCHAEFER F. Prediction of wear in hot forging tools by means of finite-element-analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, [Atlanta GA], aug. 2005, Elsevier, v. 167, p. 309–315.
- 25 NAEGELE, H. **Simulation des Herstellungsprozesses praezisionsgeschmiedeter Zahnraeder mit der Finite-Elemente Methode**. Hannover, 1995. Dr.-Ing.-thesis – Institut fuer Umformtechnik und Umformmaschinen, Universitaet Hannover. (em alemão).
- 26 AKIHIRO, M., et.al. Effects of simulation conditions on evaluation of tool temperature in hot extrusion-forging. **Journal of Materials Processing Technology**, [Atlanta GA], jul. 2006, Elsevier, n. 167, p. 251–255.
- 27 ÅKERSTROM, P. **Modelling and Simulation of Hot Stamping**. Luleå, 2006, pp.16–17. Doctoral Thesis – Division of Solid Mechanics, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Luleå University of Technology.
- 28 GRASS, H., KREMPASZKY, C., WERNER, E. 3-D FEM–simulation of hot forming processes for the production of a connecting rod. **Computational Materials Science**, [Atlanta GA], jul. 2006, Elsevier, n. 36, p. 480–489.
- 29 MESSNER, C., GRASS, H., WERNER, E.A. Reibung und Wärmeübergang beim Schmieden. **Computational Materials Science**, [Atlanta GA], nov. 2003, Elsevier, v.28, p. 469–477.
- 30 GRASS, H., WERNER, E. Ermittlung von Eingabeparametern für die Simulation von Warmumformprozessen. In: WERKSTOFFPRÜFUNG 2002–ENNWERTERMITTLUNG FÜR DIE PRAXIS, 2002, Bad Nauheim. Deutscher Verband für Materialforschung und –prüfung, 2002. pp. 125–130.

- 31 FIEBERG, C., KNEER, R. Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [Atlanta GA], jul. 2008, Elsevier, n. 51, p. 1017–1023.
- 32 HU, Z.M., BROOKS, J.W., DEAN, T.A. The interfacial heat transfer coefficient in hot die forging of titanium alloy. **Journal of Mechanical Engineering Science**, [London], 1998, Professional engineering publishing, v. 212, issue 6, p. 485–496.
- 33 NSHAMA, J., JESWIET, P.H. Oasthuizen, Evaluation of temperature and heat transfer conditions at the metal-forming interface. **Journal of Materials Processing Technology**, [Atlanta GA], 1994, Elsevier, n. 45, p. 637–642.
- 34 ROSOCHOWSKA, M., BALENDRA, R., CHODNIKIEWICZ, K. Measurements of thermal contact conductance. **Journal of Materials Processing Technology**, [Atlanta GA], abr. 2003, Elsevier, n. 135, p. 204–210.
- 35 SEMIATIN, L., et al. Determination of the interface heat transfer coefficient for non-isothermal bulk-forming processes. **Journal of Engineering for Industry**, New York, 1987, American Society of Mechanical Engineers, n.109, p. 49–57.
- 36 SCHAEFFER, Lírío. **Forjamento. Introdução ao processo**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2001, pp.28,147.
- 37 POLOZINE, A. **Desenvolvimento da Técnica para Determinação dos Parâmetros Térmicos de Contorno, aplicados ao Projeto de Peças Forjadas**. Porto Alegre-RS, 2004. pp. 52–55. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM.
- 38 POLOZINE, A., SCHAEFFER, L. Exact and approximate methods for determining the thermal parameters of the forging process. **Journal of Materials Processing Technology**, [Atlanta GA], dez. 2005, Elsevier, n. 170, p. 611–615.
- 39 POLOZINE, A., SCHAEFFER, L. Testing of Thermocouples in The High Gradient Temperature Field. **Scientific Bulletins of Rzeszow University of Technology (Mechanics73)**, Rzeszow, jun.2008. Rzeszow University of Technology, n. 253, p.239–244.
- 40 POLLOCK, D.D. **The theory and Properties of Thermocouple Elements**. ASTM STP 492. Philadelphia: American Society for the Testing of Materials, 1971. 84p.
- 41 SEEBECK, Thomas Johann. **Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz**. Leipzig: W. Engelmann, 1895. 120 p.
- 42 BURTE, P.R., et al. Measurement and Analysis of heat transfer and friction during hot

- forging. **Journal of Engineering for Industry**, New York, 1990, American Society of Mechanical Engineers, n.112, p. 332–339.
- 43 TERCELI, M., TURK, R., KNAP, M. Assessment of temperature on the die surface in laboratory hot metal forming. **Applied Thermal Engineering**, [Atlanta GA], fev. 2003, Elsevier, n.23, p. 113 –125.
- 44 MILLS, K.S. **Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys**. [Cambridge]: Woodhead Publishing Ltd., 2002. 244p.
- 45 BASAK, D., OVERFELT, R.A., WANG, D. Measurement of specific heat capacity and electrical resistivity of industrial alloys using pulse heating techniques. **International Journal of Thermophysics**, [New York]: Springer, 2003, v.24, n. 24, p.1721–1733.
- 46 BOIVINEAU, M. Thermophysical Properties of Solid and Liquid Ti–6Al–4V (TA6V) Alloy. **International Journal of Thermophysics**, [New York]: Springer, mar. 2006, v. 27, n.2, p.507–529.
- 47 SOROKIN, Vladimir. **Marcador de aços e ligas**. Moscou: Machinostroenie, 1989, p.621-629. (em russo).
- 48 Transvalor S.A. **Forming Properties DataBase. Version 1.3**. Forge 2006. [Sophia Antipolis]: Transvalor S.A., 2006. 1 CD–ROM.
- 49 ROJÉRIO, A.O. **O Forjamento de Ligas de Alumínio – Um estudo para a Liga ABNT 6061**. Porto Alegre–RS, 2001. p.19. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM.
- 50 MENDEZ, B.Y. P. F., RICE, C.S., BROWN, S.B. Joining Using Semisolid Metals. **Welding Journal**, Boston, set. 2002. Disponível em: <www.aws.org/wj/supplement/09-2002-MENDEZ-s.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2003.
- 51 Metotécnica. **Propriedades físicas de ligas Alumel, Cromel e Copel**. [Moscou], Metotécnica, [2007]. (em russo). Disponível em:<<http://metotech.ru/splavy-opisanie.htm#%D4%E8%E7%E8%F7%E5%F1%EA%E8%E5%20%F1%E2%EE%E9%F1%F2%E2%E0%20%F1%EF%EB%E0%E2%EE%E2%20%F5%F0%EE%EC%E5%EB%FC%20%D2,%20%E0%EB%FE%EC%E5%EB%FC,%20%EA%EE%EF%E5%EB%FC>>. Acesso em: 17 set. 2008.

- 52 eFUNDA* . **Tool Steels. AISI H13**. Sunnyvale, CA: eFUNDA, Inc., [2008].
Disponível em: <http://www.efunda.com/materials/alloys/tool_steels/show_tool.cfm?ID=AISI_H13&prop=cte&Page_Title=Tool%20Steel%20AISI%20H13>. Acesso em : 17 set. 2008.
- 53 F. RAMADA. AÇOS E INDÚSTRIAS. **ORVAR® 2 Microdized. Hot work tool steel**. [Porto (Portugal)], F. Ramada. Aços E. Industrias, [2007].
<<http://www.ramada.pt/acos/pdf/pdf/Orvar2M.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2008.
- 54 HOLMAN, J. P. Métodos Experimentales para ingenieros. México: McGraw–Hill, 1977. 477p.
- 55 ASM. **ASM Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials** , 10 th Edition Metals Handbook [Cleveland OH]: ASM International, v.2, 1992. 3470p.
- 56 FUKAI, K., OGAVA A., MINAKAVA K. Titanium alloy blank forging method and blank of titanium alloy for forging. Patent RU 2256001 C1. **Inventions. Utility models. Official Gazette**, Moscow: Federal Service For Intellectual Property, Patents And Trademarks (Rospatent), nov. 2005.
- 57 ASM. **ASM Handbook, Forming and Forging**. 9th Edition Metals Handbook [Cleveland OH]: ASM International, v.14, 1993. 2110p.
- 58 ATROSCHENKO Aleksey Petrovitch, et.al. **Hot Forming**: Handbook in 4.vol. Moscow: Mashinostroenie Press, v.2, 1986. 592 p. (em russo).
- 59 BELOV, Alexander Vladimirovitch, et.al. **Processos Tecnológicos e Equipamento Industrial**. Curso de lições. Volgograd, “Politécnic”, 2005. 119p. (em russo).

* A escrita da palavra “eFUNDA” é feita conforme o site <http://www.efunda.com/materials/alloys/tool_steels/show_tool.cfm?ID=AISI_H13&prop=cte&Page_Title=Tool%20Steel%20AISI%20H13>.