

DÉBORA MARIA MITTER MARQUES

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA DETERMINAÇÃO DE
GRANDEZAS DE PROCESSO DURANTE OPERAÇÕES DE
CONFORMAÇÃO DE AÇO SEMI-SÓLIDO COM OS PROCESSOS
DE TIXOFORJAMENTO E TIXOJUNÇÃO

Trabalho de formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo

SÃO PAULO
2007

DÉBORA MARIA MITTER MARQUES

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA DETERMINAÇÃO DE
GRANDEZAS DE PROCESSO DURANTE OPERAÇÕES DE
CONFORMAÇÃO DE AÇO SEMI-SÓLIDO COM OS PROCESSOS
DE TIXOCONFORMAÇÃO E TIXOJUNÇÃO

Trabalho de formatura apresentado
à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo

Área de concentração: Engenharia
Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Ronald Lesley
Plaut

SÃO PAULO
2007

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi escrito em ocasião de um intercâmbio na universidade RWTH Aachen no Instituto de Conformação de Metais (IBF). Este não seria possível sem o apoio do Prof. Dr. –Ing. Gerhard Hirt, do IBF, do Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade de São Paulo, e dos meus pais, a quem sou muito agradecida.

Agradeço também ao Dipl. –Ing. René Baadjou por ter acreditado na minha capacidade de realizar esse trabalho. Também agradeço ao Msc. Shimahara pelas valiosas sugestões na construção dos modelos.

Agradeço especialmente aos colegas do instituto que muito me ajudaram e se tornaram amigos: Dipl. –Ing. Viola Goldbach, Dipl. –Ing. Jochen Ames, Dra. Liudimila Khizhnyakova. A todos os colegas aqui não nominados também agradeço por proporcionarem um ambiente de trabalho agradável.

RESUMO

O conhecimento da janela de processo é de fundamental importância para a conformação de metais no estado semi-sólido. A simulação numérica é um instrumento eficaz para a identificação da janela de processo, que, em combinação com investigações experimentais, permite a compreensão da origem de falhas e influência de parâmetros.

Como parte deste trabalho, a conformação de uma peça axialmente simétrica foi analisada com a ajuda de simulações numéricas pelo método dos elementos finitos e resultados dos testes práticos. A variação de parâmetros tais como temperatura, velocidade do punção e duração de etapas intermediárias permite a análise da sua influência sobre a parte. Uma atenção particular será dada sobre a temperatura tanto no tarugo como nas matrizes. A aplicabilidade de uma liga de molibdênio (TZM) também é discutida. O processo de tixojunção é estudado e algumas melhorias de processo são propostas ao final do trabalho.

Palavras-chave: tixoconformação, tixoforjamento, tixojunção, semi-sólido, TZM, Forge 2, simulações numéricas, MEF

ABSTRACT

For the successful shaping of metals in the semi-solid state knowledge of the “processing window” is of fundamental importance. Numerical simulation is an efficient tool for the identification of the processing window for forming process which, in combination with experimental investigations, leads to the understanding of the origin/reason of various defects and the influence of processing parameters.

As part of this work, the forming of an axisymmetrical component was analyzed with the help of numerical simulations. Variations of the thixoforging process parameters such as temperature, intermediate step duration and punch velocity, enable the analysis of their influence on the part quality. Particular emphasis will be put on temperature, both in the billet and in the dies. The applicability of a molybdenum alloy (TZM) as a tool material for thixoforging is discussed. The thixojoining process is also simulated and some process improvements are suggested.

Key-Words: thixoforming, thixoforging, thixojoining, semi-solid, TZM, Forge 2, numerical simulation, MEF

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Comportamento do fluido no estado tixotrópico (SEIDEL, 2006).....	17
Figura 2 Propriedades tixotrópicas	18
Figura 3 Diferentes processos de conformação no estado semi-sólido (DANCETTE, 2005)	20
Figura 4 Gráfico de fases pseudo-binário para o sistema Fe-Cr-C para o aço X210CrW12 obtido por Thermo-calc (DANCETTE, 2005)	22
Figura 5 Janela de conformação no estado semi-sólido obtida por análise por DTA (DANCETTE, 2005)	24
Figura 6 Evolução da microestrutura ao longo da tixoconformação	24
Figura 7 Célula de tixoconformação no IBF	25
Figura 8 Princípio do aquecimento indutivo: I é a corrente elétrica na bobina e Ik é a corrente induzida (VOIGT, 2006).....	26
Figura 9 Forno de indução.....	27
Figura 10 Estrutura globulítica no estado semi-sólido após o aquecimento	28
Figura 11 Segundo passo: abertura do forno de indução	28
Figura 12 Garras do robô feitas de cerâmica isolante. Acima pela mangueira gás argônio é fornecido.....	29
Figura 13 Esquema dos passos 4 e 5: primeiramente as matrizes são fechadas, e depois o punção sobe, conformando o material	29
Figura 14 Esquema de processo de tixojunção	30
Figura 15 Micrografias dos principais defeitos encontrados no processo estudado: item 6: segregação, item 3: superfície soldada à frio, item 7: superfície fria	33
Figura 16 Representação esquemática da janela de temperatura.....	34
Figura 17 Esquema da seqüência das simulações e das grandezas estudadas	37
Figura 18 Ilustração do modelo A e suas condições de contorno.....	38
Figura 19 Ilustração do modelo B e suas condições de contorno.....	39
Figura 20 Ilustração do modelo C para tixoforjamento e suas condições de contorno.....	39
Figura 21 Ilustração do modelo C para tixojunção e suas condições de contorno.....	40
Figura 22 Modelo D para tixoforjamento e suas condições de contorno	40
Figura 23 Ilustração do modelo D para tixojunção e suas condições de contorno.....	41
Figura 24 Influência da oxidação no transporte do tarugo, “melhor caso” à esquerda e “pior caso” à direita	46

Figura 25 Influência da oxidação no tarugo durante o fechamento das matrizes melhor caso à direita, pior caso à esquerda.....	47
Figura 26 Gradiente de temperatura do tarugo após o fechamento das matrizes e antes da tixojunção.....	48
Figura 27 Gradiente de temperatura final após 1,5 s à direita e 2,5 s à esquerda no modelo A.....	50
Figura 28 Gradiente de temperatura logo após 1,5 s à esquerda e 2,5 s à direita no modelo B.....	51
Figura 29 Gradiente de temperatura após modelo C com duas durações: 1,5 s à direita e 2,5 s à esquerda.....	51
Figura 30 Influência do material da ferramenta no gradiente de temperatura do tarugo	53
Figura 31 Distribuição da temperatura nos punções de aço e de TZM.....	54
Figura 32 Influência da temperatura do punção no tarugo: 300 °C à esquerda e 400 °C à direita	56
Figura 33 Gradiente de temperatura no punção após etapa de fechamento das matrizes e antes da conformação: à esquerda com 300 °C e à direita com 400 °C	56
Figura 34 Representação esquemática do resfriamento do tarugo ao longo do processo, antes da conformação: vermelho é a área dentro da janela de temperatura adequada, azul é abaixo dela	57
Figura 35 Diferença de gradientes de temperatura ao final da conformação a partir de partes com duração de modelo C igual à 1,5 s (à esquerda) e 2,5 s à direita	60
Figura 36 Gradiente de temperatura do tarugo para punção e matrizes de aço (à esquerda) e punção e matrizes de TZM (à direita)	63
Figura 37 Gradiente de temperatura nas ferramentas de aço após a conformação	64
Figura 38 Gradiente de temperatura nas matrizes de aço e no punção de TZM	65
Figura 39 Gradiente de temperatura nas matrizes e punção de TZM.....	65
Figura 40 Representação esquemática do resfriamento do tarugo ao longo do processo, antes da conformação: vermelho é a área dentro da janela de temperatura adequada, azul é abaixo dela	66
Figura 41 Representação da origem de falhas com respeito ao gradiente de temperatura.....	66
Figura 42 Representação da tixojunção após simulação com o software Forge 2	69
Figura 43 Formação de áreas isoladas a temperaturas mais altas nos pontos 1 e 2 a 0,49 s do início da conformação	70

Figura 44 Gradiente de temperatura nas ferramentas e nas peças a serem unidas por tixojunção	71
Figura 45 Distribuição da temperatura no material tixotrópico durante a tixojunção e falhas típicas	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Vantagens e desvantagens da conformação no estado semi-sólido	15
Tabela 2 Composição química do aço X210CrW12 segundo a norma DIN (MEUSER, 2003)	23
Tabela 3 Resumo das grandezas de processo consideradas e seus valores	36
Tabela 4 Etapas do processo e seus modelos	37
Tabela 5 Propriedades físicas dos materiais aplicados	42
Tabela 6 Valores de emissividade encontrados em trabalhos anteriores para o X210CrW12 no estado semi-sólido	45
Tabela 7 Simulações para representação da influência da oxidação	45
Tabela 8 Parâmetros das simulações para avaliação da influência do material das ferramentas	52
Tabela 9 Condições de contorno das simulações para verificação da influência da temperatura da ferramenta	55
Tabela 10 Condições de contorno das simulações para verificação da influência da duração das etapas intermediária na temperatura final do tarugo.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

DIN	Instituto de normatização alemão <i>Deutsches Institut für Normung</i>
AISI	Instituto americano do ferro e do aço <i>American Iron and Steel Institut</i>
IBF	Instituto de conformação de metais <i>Institut für Bildsame Formgebung</i>
RWTH	Universidade Técnica da Renânia-Vestfália <i>Reihnisch Westfächliche Technische Hochschule</i>
SFB289	Linha 289 de pesquisa especial da associação alemã de pesquisa <i>Sonderforschungsbereich 289 der Deutschen Forschungsgemeinschaft</i>
\dot{q}	Taxa de transferência de calor
$\dot{\epsilon}_{ij}$	Grau de deformação médio local
α	Coeficiente de transporte de calor
T	Temperatura
ϵ	Emissividade
ρ	Densidade
ϕ	Calor de deformação
η	Dissipação
λ	Difusividade térmica
α_k	Coeficiente de transferência de calor convectivo
k	Coeficiente de transferência de calor
C_s	Constante de Boltzmann
σ_{ij}	Tensor de tensão
K_f	Tensão de Escoamento
E	Módulo de Young
μ	Coeficiente de atrito

ERRATA

PÁGINA	LINHA	ONDE SE LÊ	LEIA-SE
15	6	Chiaverini	G. Chiarmetta
17	3	Msc. Flemings e Dr. Spencer	M.C. Flemings e D. B. Spencer
22	3	ledeburítico	composto de austenita e carbonetos
23	26	O aço X210CrW12 apresenta uma tendência à formação de estrutura globulítica, devido à grande quantidade de carbonetos de cromo que se segregam durante a solidificação (HIRT, 2005 e MEUSER, 2003)	O aço X210CrW12 apresenta tendência à formação de estrutura globulítica (HIRT, 2005). Carbonetos secundários encontram-se segregados e dispersos em contornos de grão na estrutura à temperatura ambiente. Quando o material é aquecido até o equilíbrio austenita + carbonetos M_7C_3 + fase líquida, os carbonetos coalescem (e/ou se transformam) nos contornos de grãos levando à esferoidização da austenita e à formação de estrutura globulítica (MEUSER, 2003).
32	8	$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 T + \phi$	$\frac{\rho c_p \Delta T}{\delta t} = \text{div}(\lambda \nabla T) + \phi$
36	9	1.2343	1.2343 (ou X38CrMoV5-1 na norma DIN, corresponde ao H1 na norma AISI, e é composto por 0,38 C, 1,0 Si, 5,3 Cr, 1,3 Mo, e 0,4 V % em peso)
36	10	TZM	TZM (composto por 0,5 Ti, 0,08 Zr, 0,02 C, % em peso)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	13
2	ESTADO DA ARTE	15
2.1	BASES DA REOLOGIA.....	16
2.2	TIXOCONFORMAÇÃO: UMA VISÃO GERAL	18
2.2.1	Preparação do material tixotrópico.....	18
2.2.2	Aquecimento e Conformação	19
2.3	INFORMAÇÕES GERAIS DOS PROCESSOS.....	21
2.3.1	O aço X210CrW12	21
2.3.2	Tixoconformação em termos de tixoforjamento e tixojunção	25
2.3.3	O processo de tixoforjamento estudado	27
2.3.4	O processo de tixojunção estudado	30
2.4	SIMULAÇÃO COM O MEF	30
2.4.1	Modelamento de materiais para a tixoconformação.....	31
2.4.2	Análise termo-mecânica.....	31
3	REPRESENTAÇÃO DA JANELA DE PROCESSO EM TIXOCONFORMAÇÃO	33
3.1	CONSTRUÇÃO DOS MODELOS	37
3.2	OBTENÇÃO DE DADOS MATERIAIS	41
4	MEF-EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA APARTIR DO AQUECIMENTO.....	43
4.1	Influência da oxidação.....	45
4.2	Influência da duração de etapas intermediárias.....	48

4.3	Influência do material das ferramentas	52
4.4	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DA FERRAMENTA	54
4.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	56
5	MEF-CONFORMAÇÃO ATRAVÉS DE TIXOFORJAMENTO.....	59
5.1	INFLUÊNCIA DA DURAÇÃO DAS ETAPAS.....	59
5.2	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO PUNÇÃO	61
5.3	INFLUÊNCIA DO MATERIAL DA FERRAMENTA	62
5.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	65
6	MEF-CONFORMAÇÃO ATRAVÉS DE TIXOJUNÇÃO	68
6.1	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
7	CONCLUSÕES.....	73
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
	ANEXO A.....	79

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Cerca de trinta anos foram investidos na pesquisa de processos de conformação no estado semi-sólido. Estes processos são nomeados thixoforming em inglês e tixoconformação em português, e podem ser classificados como processos em que há relativamente pouca perda de material e poucas etapas intermediárias (“near-net-shape”).

A tixotropia, propriedade reológica presente em metais no estado semi-sólido com microestrutura globulítica, é aproveitada para conformar peças à baixas cargas e em uma única etapa de forjamento. Hoje são produzidos milhões de peças automotivas de alumínio por tixoconformação no mundo inteiro, e aplicações em cerâmica, ferro fundido, e materiais compósitos estão sendo estudadas (ATKINSON, 2005). Existe um esforço recente sendo feito na direção de viabilizar a conformação no estado semi-sólido em aço, especialmente aço-ferramenta, a fim de substituir processos de forjamento que exigem várias etapas de peças de geometria complexa. Uma das vantagens está na tendência à formação de microestrutura globulítica apresentada por esses aços, o que dispensaria processos dispendiosos de preparação da microestrutura globulítica (MEUSER, 2003).

O controle de processo representa um desafio para a aplicação de tixoconformação: primeiramente porque as propriedades do fluido tixotrópico apresentam grande dependência da temperatura, da taxa de aquecimento, da pressão, da taxa de deformação, e da deformação; em segundo lugar porque o processo é realizado a altas temperaturas, o que provoca altas taxas de transferência calor por convecção e radiação. Portanto, o entendimento da janela do processo através do estudo pelo método dos elementos finitos é um primeiro passo no estudo de melhoria de processos.

Este trabalho foi realizado em ocasião de um intercâmbio acadêmico realizado de agosto de 2006 a fevereiro de 2007 no instituto de conformação de metais (IBF) da

universidade da renânia vestifália na cidade de Aachen (RWTH)¹, Alemanha. Dois processos de tixoconformação do aço DIN X210CrW12 (correspondente ao D4 ou D6 da norma AISI) para trabalho à quente estudados no instituto (tixoforjamento e tixojunção) foram modelados e simulados desde o resfriamento do material logo após a etapa de aquecimento, até o final da conformação de peças axialmente simétricas através do software Forge 2, da TRANSVALOR.

Ainda neste trabalho, o modelamento de tixoconformação por softwares comerciais que usam o método elementos finitos, a obtenção dos dados materiais para isso necessários, e os desafios da tixoconformação de aço é abordada. Os resultados obtidos foram comparados com os resultados experimentais e analisados a partir da experiência do grupo de estudo em tixoconformação daquele instituto.

¹ Instituto de Conformação de Metais (*Institut für Bildsame Formgebung der RWTH*), Aachen,

2 ESTADO DA ARTE

A tixoconformação é particularmente interessante por permitir a união das vantagens da fundição e do forjamento. Se o pré-material for conformado em sua janela de processo, é possível evitar erros típicos de fundição como porosidades e inclusões e obter uma microestrutura com propriedades mecânicas próximas à de um forjado (ZAVALLINGOS, 1995). Chiaverini afirma que praticamente todas as ligas economicamente interessantes podem ser processadas por tixoconformação (CHIARMETTA, 1996).

Tabela 1 Vantagens e desvantagens da conformação no estado semi-sólido

Processo	Vantagens	Desvantagens
Forjamento	<ul style="list-style-type: none"> • Microestrutura favorável; • Boas propriedades mecânicas; 	<ul style="list-style-type: none"> • Altas cargas; • Necessidade de ferramentas revestidas; • Não adequada para peças de geometria complexa;
Fundição	<ul style="list-style-type: none"> • Adequada para peças com geometria complexa; • Baixas cargas; 	<ul style="list-style-type: none"> • Escoamento turbulento; • Microestrutura de fundição; • Porosidade residual; • Inclusão de gases; • Propriedades mecânicas inferiores;
Conformação no estado semi-sólido	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade de produção de peças com geometria complexa; • Aplicação de baixas cargas; • Baixa porosidade; • Microestrutura aceitável; • Facilidade de Manuseio ; • Escoamento laminar; 	<ul style="list-style-type: none"> • Requer controle cuidadoso • Possível segregação de fases

2.1 BASES DA REOLOGIA

Segundo a norma DIN² 13342, os fluidos são assim denominados:

- Fluidos newtonianos: São fluidos para os quais a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento. A constante de proporcionalidade é conhecida por viscosidade, e esta é a única constante da lei de escoamento;
- Fluidos não-newtonianos: são líquidos com viscosidade não-linear. Viscoelasticidade linear ou viscoelasticidade não-linear entram nesta classe de fluidos;

Fluidos tixotrópicos não podem ser classificados como fluidos não-newtonianos porque suas propriedades reológicas mudam com o tempo. Outra particularidade dos fluidos tixotrópicos está no fato destes não armazenarem energia mecânica em energia elástica, e assim, não apresentarem recuperação desta após a aplicação de tensão (ATKINSON, 2005). Assim, eles entram na seguinte classificação:

- Fluidos com propriedades reológicas dependentes do tempo: Aqui são reunidos os fluidos cujas propriedades reológicas mudam com o tempo. Tixotropia e Reopexia entram nesta classificação. Tixotropia é definida como "redução da viscosidade dependente do tempo durante aplicação de carregamento mecânico e aumento da mesma quando da retirada do carregamento" (MEYER, 2000), enquanto reopexia é o inverso da tixotropia: aumento da viscosidade com aplicação de carregamento mecânico, e redução da mesma quando da sua retirada.

² Instituto de normatização alemão (Deutsches Institut für Normung)

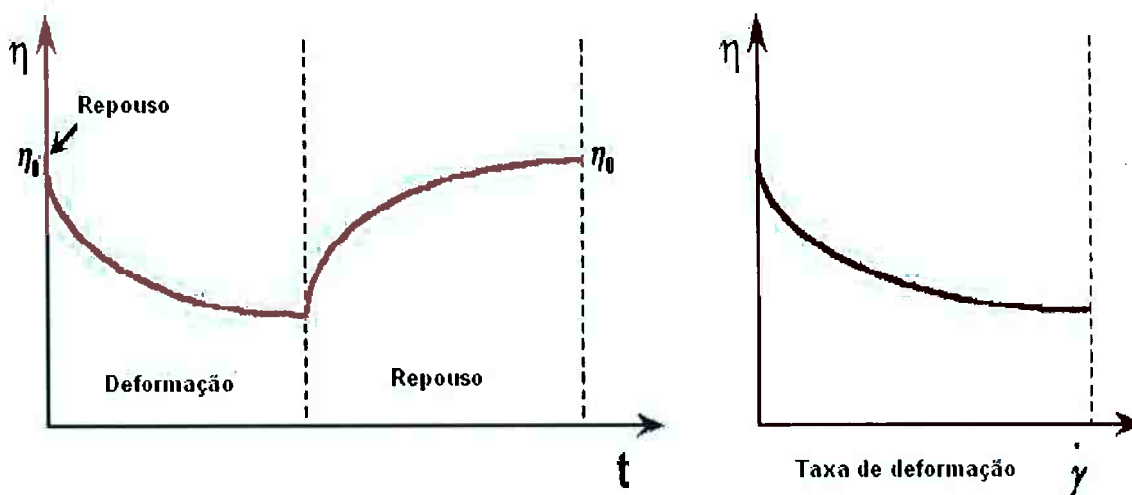


Figura 1 Comportamento do fluido no estado tixotrópico (SEIDEL, 2006)

A tixotropia em metais foi descoberta nos anos 70 por Msc. Flemings e Dr. Spencer no MIT³ (ATKINSON, 2005). Foi observado que a viscosidade de metais no estado semi-sólido era muito menor caso fossem deformados durante a solidificação, do que se solidificassem em repouso. Durante o cisalhamento, os braços das dendritas quebravam, formando uma estrutura globulítica cercada de fase líquida com propriedades diferenciadas. A razão para isto é que a fase líquida escoava entre a estrutura globulítica durante a conformação provocando aglomeração e separação de globulitas aglomeradas (vide Figura 2) (ATKINSON, 2005).

As esferas da fase sólida tocam umas às outras e, se a orientação for favorável, formam contornos, que podem formar uma rede tridimensional capaz de sustentar o peso do conjunto. Quando esse comportamento é observado (o que no item 3.1 veremos que é característico do tixoforjamento), o material pode ser modelado como um sólido (ATKINSON, 2005).

³ Instituto de Tecnologia de Massachusett (*Massachusetts Institut of Technologie*)

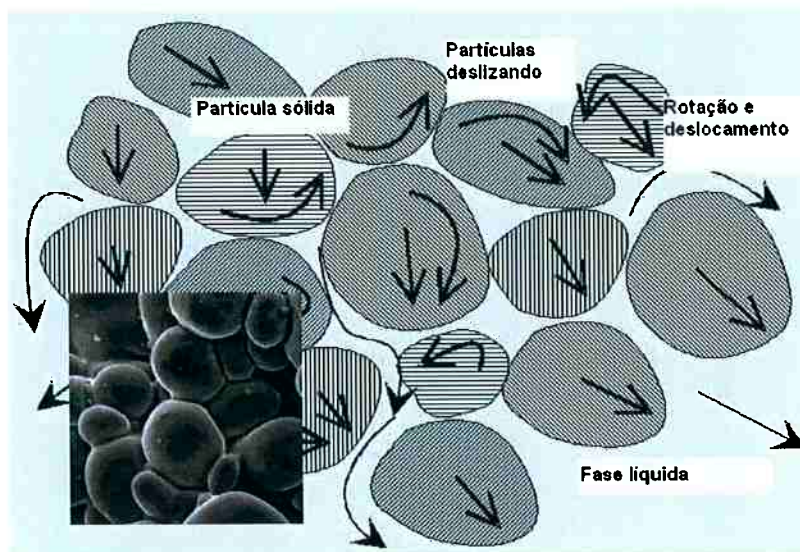


Figura 2 Propriedades tixotrópicas

2.2 TIXOCONFORMAÇÃO: UMA VISÃO GERAL

Podemos separar os processos de tixoconformação em três etapas: preparação do tarugo, aquecimento e conformação. A matéria prima deve, quando aquecida, apresentar fase sólida com estrutura globulítica, a fim de permitir a movimentação da fase líquida durante a conformação. Veremos a seguir as principais rotas de conformação no estado semi-sólido.

2.2.1 Preparação do material tixotrópico

- Agitação magnética-hidrodinâmica ou MHD, (*Magnetohydrodynamic*): O material é agitado por meio de um campo magnético induzido, e os braços de dendritas são quebrados, produzindo uma estrutura globulítica.
- Rota termo-mecânica: SIMA (*Strain Induced Melt Activated*) ou RAP (*Recrystallization and Partial Melting*) são os processos mais conhecidos e têm o mesmo princípio. O material é trabalhado à quente ou à morno. Quando ocorre a recristalização, o líquido penetra entre os contornos de grão e a estrutura produzida é globulítica.

- Reo-processos: O material é aquecido até o estado semi-sólido e então é despejado numa rampa. Ao longo desta, os braços de dendritas são quebrados, e quando o material é recolhido, apresenta a estrutura desejada (HIRT, 2005). Vale lembrar que essa estrutura pode apresentar aspecto de roseta, e não ser completamente globulítica (ATKINSON, 2005).

Existem vários processos, como a atomização, outros que envolvem agitação e ciclos térmicos como o “*New MIT Method*”® e que envolvem a aplicação de refinadores de grão (ATKINSON, 2005).

2.2.2 Aquecimento e Conformação

Em geral, um processo recebe o prefixo “tixo” quando o material tixotrópico é preparado, resfriado (para transporte, por exemplo), depois aquecido e então conformado. O nome mais amplo para conformação no estado-semi-sólido pode ser traduzido como tixoconformação. O aquecimento desse material deve ser rápido o bastante para que a estrutura formada no processo anterior permaneça globulítica: aquecimentos lentos podem levar à formação de dendrita. Nesse item pretende-se esclarecer a diferença entre os principais processos de conformação no estado semi-sólido (Vide Figura 3).

- Reofundição: Conforme indicado no item 2.2.1, o metal passa por uma rampa em uma temperatura próxima à liquidus e torna-se tixotrópico, podendo assim, ser despejado e injetado diretamente em um molde.
- Tixofundição e tixoforjamento: Ambos os processos são denominados tixoconformação. A grande diferença está no fato de que no primeiro o material é injetado em moldes fixos, enquanto no segundo as matrizes se movimentam forjando o material. Para tanto, a fração líquida muda de um caso para outro, variando de 40 a 60% respectivamente.

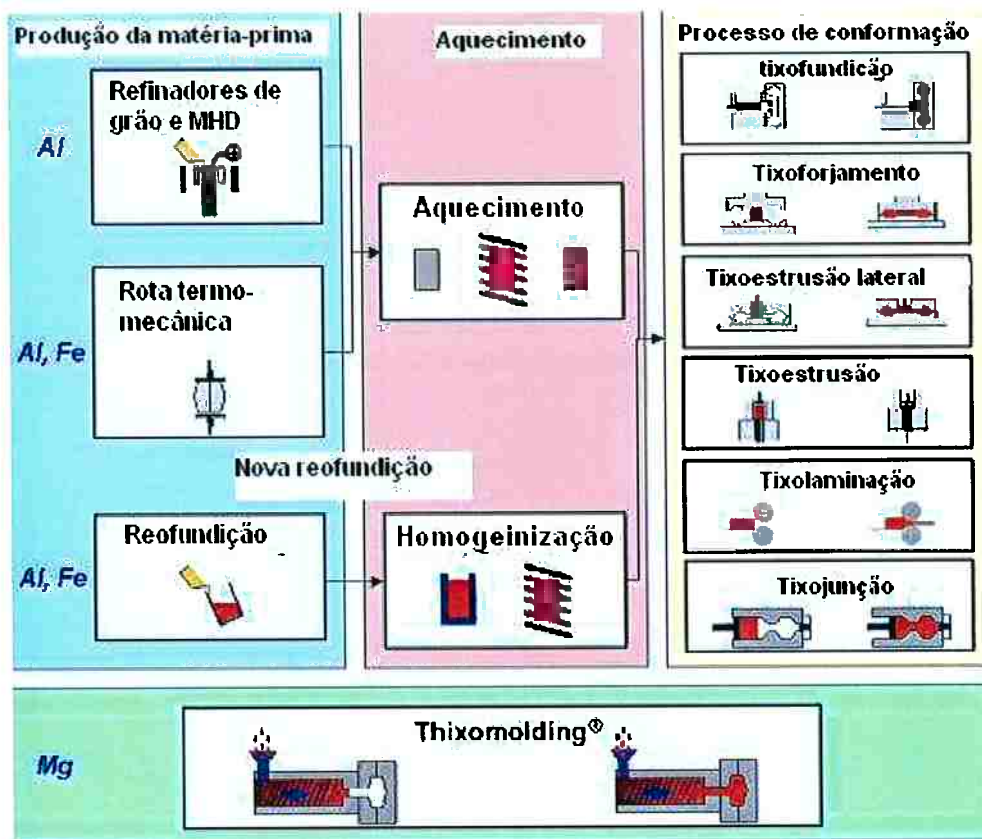


Figura 3 Diferentes processos de conformação no estado semi-sólido (DANCETTE, 2005)

Assim como para o forjamento, variantes de outros processos de conformação podem ser adaptados para o material no estado semi-sólido. Uma variante nova que vem sendo estudada recentemente no IBF é a união de metais diferentes através da tixojunção. Partes metálicas no estado sólido são envolvidas durante a conformação pelo material semi-sólido, abrindo assim o leque de aplicação do processo.

Os processos de conformação no estado semi-sólido se distinguem da fundição sob pressão pelo fato de que no primeiro, o material está no estado semi-sólido antes da injeção, enquanto no último, a solidificação ocorre apenas depois que o material entrou em contato com o molde. Além disso, o material tixotrópico apresenta estrutura globulítica, enquanto não há manipulação da estrutura formada no material da injeção sob pressão quando este começa a resfriar em contato com o molde.

Em comparação com o alumínio, o aço apresenta maiores desafios à tixoconformação (KOPP, 2004):

- Aquecimento: Uma estratégia de aquecimento especial é necessária, devido às perdas de temperatura com a transformação à temperatura de Curie, e às maiores perdas por radiação.
- Oxidação: Ao contrário do alumínio, a oxidação no aço não leva à passivação. Com isso, faz-se necessário a utilização de um gás inerte para proteção do metal ao longo do aquecimento e do transporte.
- Altas cargas na ferramenta: Altas cargas devido à corrosão de contato, carregamento mecânico e choque térmico levam a uma maior exigência da ferramenta.

2.3 INFORMAÇÕES GERAIS DOS PROCESSOS

O processo estudado neste trabalho faz parte de um projeto de nome SFB289⁴, que trata de tixoconformação e reofundição em alumínio e aço. Dentro dessa linha de pesquisa estudam-se os processos de tixoforjamento e tixojunção do aço X210CrW12.

2.3.1 O aço X210CrW12

Segundo o gráfico pseudo-binário para o sistema Fe-Cr-C obtido através do programa *Thermo-calc* (MEUSER, 2003 e DANCETTE, 2005), as principais fases em equilíbrio são (Vide Figura 4):

- ferrita + carbonetos M_7C_3 , [25°C - 762°C]
- austenita + carbonetos M_7C_3 , [777°C - 1245°C]
- austenita + carbonetos M_7C_3 + fase líquida, [1245°C - 1256°C]
- austenita + fase líquida, [1256°C - 1358°C]

² SFB: *Sonderforschungsbereich* ou linha de pesquisa especial de n. 289 thixoforming, financiado pela DFG: *Deutsche Forschungsgemeinschaft* :Sociedade alemã de pesquisa

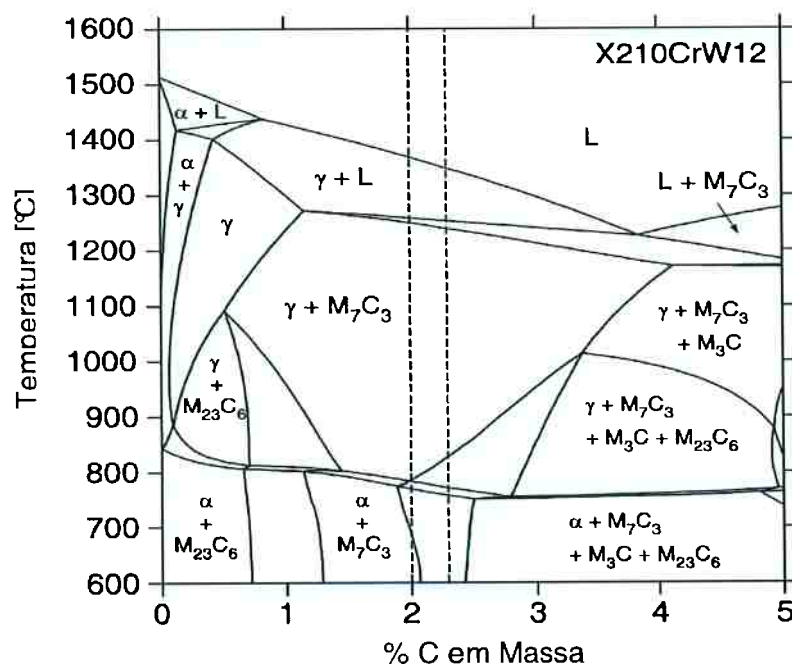


Figura 4 Gráfico de fases pseudo-binário para o sistema Fe-Cr-C para o aço X210CrW12 obtido por Thermo-calc (DANCETTE, 2005)

O aço X210CrW12 é um aço ledeburítico de trabalho à frio equivalente ao D4 ou o D6 na norma AISI (INGERSOLL, 2008 e MATWEB, 2008). Sua composição pode ser verificada a seguir (Vide Tabela 2).

Tabela 2 Composição química do aço X210CrW12 segundo a norma DIN (MEUSER, 2003)

Composição	Porcentagem em peso
C	2,00-2,30
Si	0,10-0,40
Mn	0,30-0,60
Cr	11,0-13,0
W	0,7-0,8
V	0.7-0.8

Trabalhos anteriores realizados com o aço X210CrW12 confirmaram a sua capacidade de ser tixoconformado e mostrou as seguintes vantagens em relação a outros materiais (MEUSER, 2003):

- Janela de trabalho relativamente grande: Através de análises por DTA e cálculos teóricos obtêm-se um intervalo de solidificação de cerca de 181 °C. Taxa de aquecimento crescente pode desviar as curvas de temperatura por fração sólida mais para a direita. Com aquecimentos mais lentos, a temperatura de trabalho pode chegar a 1260 °C. Outros resultados obtidos em experiências anteriores indicam que o tempo entre o aquecimento e a conformação pode levar a um desvio da curva (vide Figura 5), no sentido de permitir maiores frações líquidas a temperaturas mais baixas.
- Facilidade na investigação: O aço X210CrW12 apresenta vantagens quanto à pesquisa como modelo de aço devido à sua composição química: o resfriamento de amostras deste em água não leva à formação de martensita. Isso permite a caracterização metalográfica e o estudo de parâmetros de estrutura e um melhor estudo da janela de processo, inclusive para o reaquecimento.
- Tendência à formação de estrutura globulítica: O aço X210CrW12 apresenta uma tendência à formação de estrutura globulítica, devido à grande quantidade de carbonetos de cromo que se segregam durante a solidificação (HIRT, 2005 e MEUSER, 2003).

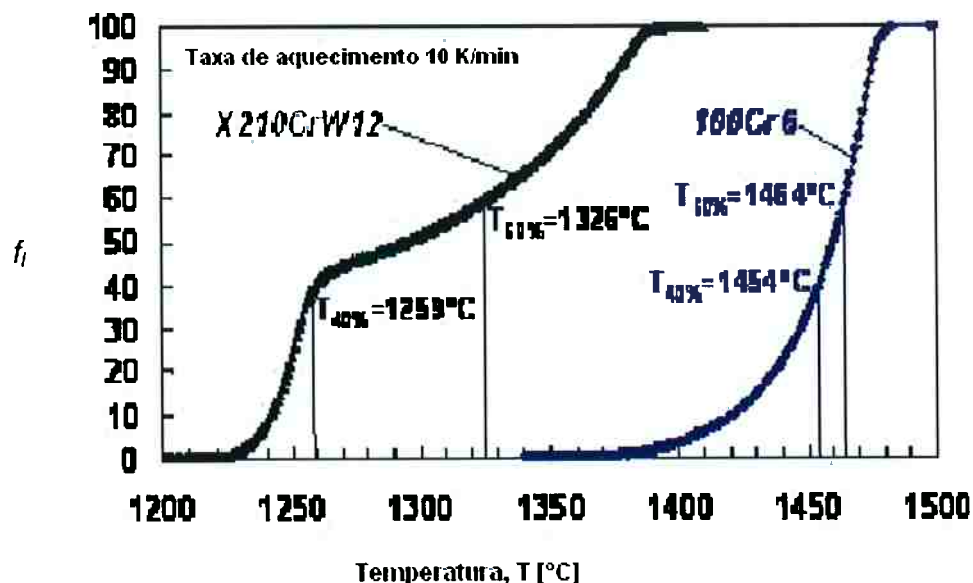


Figura 5 Janela de conformação no estado semi-sólido obtida por análise por DTA (DANCETTE, 2005)

O material é fornecido como barras trabalhadas à quente, das quais são feitos os tarugos, que são aquecidos até o intervalo de solidificação por um ciclo no qual se obtém estrutura globulítica. Durante a conformação e após a mesma, o material é resfriado controladamente. A evolução da microestrutura ao longo do tixoforjamento pode ser observada na Figura 6.

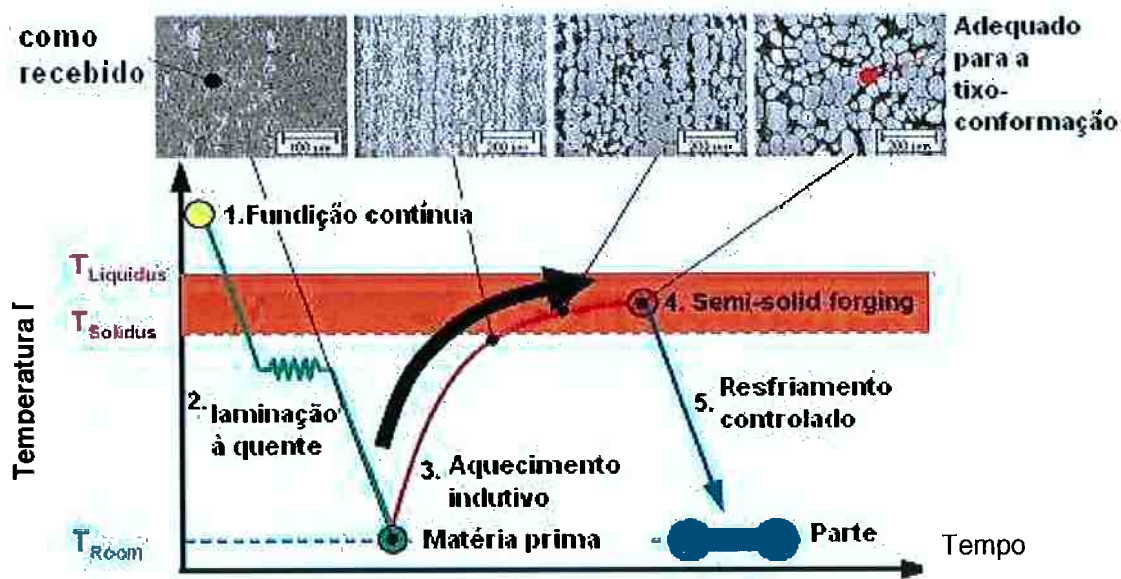


Figura 6 Evolução da microestrutura ao longo da tixoconformação

2.3.2 Tixoconformação em termos de tixoforjamento e tixojunção

A célula tixoconformação utilizada na linha de pesquisa mencionada no item 2.3 e nos processos modelados neste trabalho é composta dos seguintes equipamentos (KOPP, 2004) (Vide Figura 7):

1. Prensa hidráulica com as matrizes e punção montados
2. Forno de indução
3. Estoque de tarugos
4. Robô industrial para manipulação do tarugo com garras especiais
5. Unidade para retirada de peças



Figura 7 Célula de tixoconformação no IBF

No aquecimento indutivo a energia elétrica flui através de uma bobina, produzindo um campo magnético alternado em seu interior. Ao colocarmos um corpo metálico dentro da bobina, surge uma corrente que circula ao longo das secções do corpo transversais ao campo magnético (VOIGT, 2006). Isso resulta no aquecimento do corpo conforme a lei de Joule (Vide Figura 8).

O forno de indução utilizado na célula utiliza-se desse princípio. Com uma potência máxima de 50 kW e uma frequência de 2 kHz. Ele foi desenvolvido a fim de prover um aquecimento rápido e homogêneo ao longo do aquecimento. Este é composto de um tubo de quartzo dentro de uma caixa de madeira. Esse cubo é isolado termicamente por uma manta, e ao redor desta há uma bobina, pela qual passa corrente elétrica. O tarugo é suportado por uma peça de silicato de cálcio, que pode ser deslocada verticalmente. Na parte superior, o forno é coberto por uma peça também de silicato de cálcio. Gás argônio é fornecido por um tubo através dessa peça, a fim de evitar oxidação.

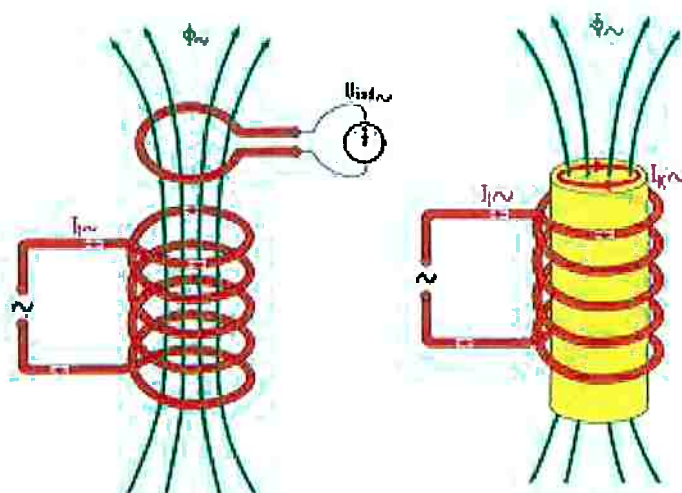


Figura 8 Princípio do aquecimento indutivo: I é a corrente elétrica na bobina e I_k é a corrente induzida (VOIGT, 2006)

O forno foi projetado para tarugos de diâmetro de 30 a 40 mm, e altura de 40 a 80 mm. No processo que será simulado nesse trabalho, um tarugo de 50 x ϕ 34 mm é aquecido primeiramente até a temperatura solidus através de uma potência de 35 kW, depois parcialmente fundido por 25 s, e depois homogeneizado na temperatura correspondente à fração líquida desejada.



Figura 9 Forno de indução

A prensa utilizada tem força máxima de 6,3 MN, velocidade máxima de 120 mm/s. Adicionalmente, há um punção independente cuja velocidade máxima é de 100 mm/s, e força máxima de 1 MN. Através da manta ao redor das matrizes, é possível aquecê-las até no máximo 500 °C.

Os tarugos são estocados e automaticamente fornecidos a um robô que cuida de todo o transporte da peça ao longo do processo. Ao final da conformação, a parte é deixada sobre um suporte. O robô industrial utilizado é um braço com seis eixos, e suas garras são revestidas também por silicato de cálcio. A fim de evitar oxidação, gás argônio é fornecido pela parte superior da garra (KOPP, 2004).

2.3.3 O processo de tixoforjamento estudado

O processo pode ser dividido em três etapas principais: aquecimento, transporte e conformação:

- 1º. Passo: O material é aquecido no forno de indução até que a temperatura correspondente à fração líquida desejada seja atingida, e a estrutura globulítica seja formada.

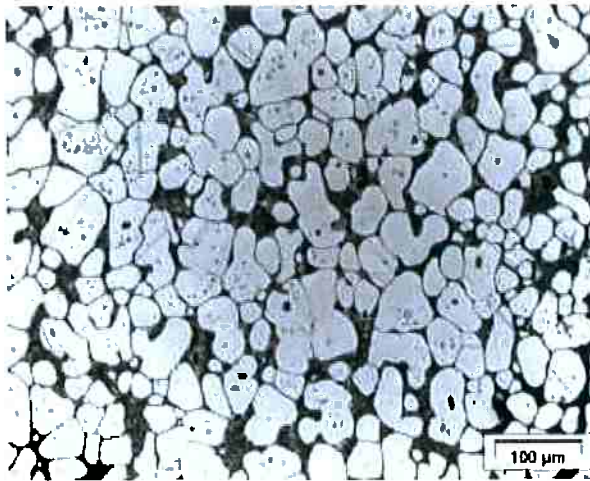


Figura 10 Estrutura globulítica no estado semi-sólido após o aquecimento

- 2º. Passo: Após o aquecimento, o forno é aberto através do deslocamento do suporte cerâmico para baixo.



Figura 11 Segundo passo: abertura do forno de indução

- 3º Passo: O material tixotrópico é então levado à prensa pelo robô e deixado entre as duas matrizes.



Figura 12 Garras do robô feitas de cerâmica isolante. Acima pela mangueira gás argônio é fornecido

- 4º Passo: As matrizes são então fechadas;
- 5º Passo: O punção sobe, conformando o material em um só passo;
- 6º Passo: A pressão é mantida até que a peça densifique e solidifique completamente;
- 7º Passo: A parte é selecionada pelo robô, e deixa da no equipamento para posterior retirada.

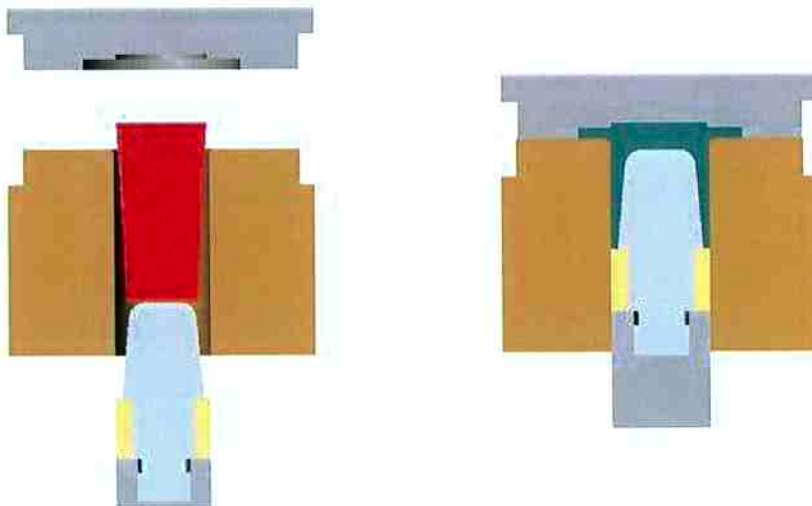


Figura 13 Esquema dos passos 4 e 5: primeiramente as matrizes são fechadas, e depois o punção sobe, conformando o material

2.3.4 O processo de tixojunção estudado

Nesse processo são seguidos os mesmos passos do tixoforjamento. A única diferença é que duas peças são inseridas anteriormente dentro da cavidade da matriz inferior, de forma que o X210CrW12 no estado semi-sólido as envolva durante a conformação. As peças a serem deixadas dentro da cavidade podem ser de cobre e bronze, conforme o caso estudado. O objetivo desse processo é aumentar o leque de aplicações para a tixoconformação. Assim, peças mais complexas poderão ser fabricadas.

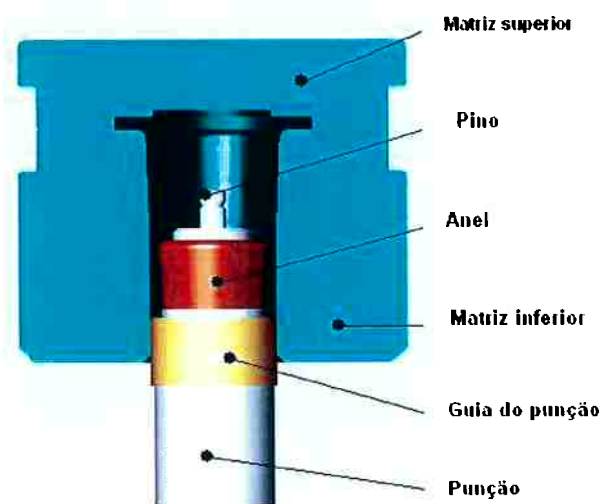


Figura 14 Esquema de processo de tixojunção

2.4 SIMULAÇÃO COM O MEF

O Método dos Elementos Finitos (MEF) apresenta-se como uma ferramenta importante na simulação de processos de conformação mecânica, por possibilitar a obtenção de grandezas impossíveis de serem obtidas em modelos físicos, mas que são determinantes das propriedades mecânicas. Um exemplo de grandeza é a taxa de deformação, que, assim como a microestrutura e o histórico de conformação do material, definem a tensão de escoamento do mesmo, refletindo na carga máxima requerida da prensa (KOPP, 1998).

Através de softwares comerciais, a resolução de equações diferenciais é relativamente simples: o usuário tem apenas o trabalho de inserir os desenhos CAD das peças relevantes, definir alguns parâmetros do processo e da rede de

elementos finitos para construir o modelo. Na construção, as partes envolvidas são subdivididas em elementos menores (que formam a rede de elementos finitos), e os materiais constituintes são modelados como meios contínuos. Durante a simulação, o programa resolve sistemas de equações de transporte de massa e de calor para os nós da rede (BREMER, 1996).

2.4.1 Modelamento de materiais para a tixoconformação

Existe uma série de modelos matemáticos que descrevem o comportamento de materiais tixotrópicos (ATKINSON, 2005). Podemos dividir os modelos disponíveis em softwares comerciais que aplicam o MEF em três grandes grupos: os que modelam os materiais tixotrópicos como líquidos com alta viscosidade, sólidos com baixa tensão de escoamento, ou como um material composto por duas fases. Assim, a escolha do modelo matemático depende muitas vezes do programa que está sendo utilizado. Não existe um consenso do melhor modelo, já que isso depende da fração líquida presente no material a ser modelado, do processo de interesse e do que o programa utilizado é capaz de calcular.

Metais a altas temperaturas no estado sólido apresentam escoamento dependente da taxa de deformação. Por isso, a conformação de metais é modelada segundo o modelo visco-plástico em programas que utilizam o MEF (KOBAYASHI, 1998), como o Forge 2. Como a fração líquida do material a ser tixoconformado é relativamente baixa, este pode ser modelado como um sólido visco-plástico. Isso implica na obtenção e aplicação da curva de escoamento do material à altas temperaturas.

2.4.2 Análise termo-mecânica

O transporte de calor pode ser dividido entre aquele que ocorre dentro do corpo (condução térmica) e entre o corpo e o seu ambiente circundante (transferência de calor, subdividida em convecção térmica e radiação). A fim de simular a transferência de calor ao longo dos processos, são aplicadas as seguintes leis da teoria elementar (KOPP, 1998).

- Transferência de calor: Transporte de calor devido ao contato do elemento com seu ambiente. Tomando α_k como o coeficiente de transferência de calor

(em $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), T_1 como a temperatura na superfície e T_2 a temperatura no meio circundante. Se a equação for aplicada para calcular a perda de calor por convecção, ou seja, a perda de calor devido ao contato do tarugo com líquidos ou gases, α é chamado de α_k ou h .

$$\dot{q} = \alpha(T_1 - T_2) \quad (2.4.2-1)$$

- Condução de calor: A equação de Fourier para a transferência de calor com um coeficiente independente da coordenada é dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla^2 T + \phi \quad (2.4.2-2)$$

λ é a condutibilidade térmica (em $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), ρ a densidade, (kg.m^{-3}), c_p é o calor específico, ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) e ϕ o calor gerado dentro do corpo, no caso da conformação, gerado através da conformação.

- Radiação: A perda de calor por radiação (através de onda eletromagnética) é regida pela seguinte lei:

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_1 - T_2) = \varepsilon \cdot C_s (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.4.2-3)$$

T_1 é a temperatura do corpo mais quente, e T_2 a temperatura do mais frio. C_s é a constante de Boltzmann ($C_s = 5,77 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), e ε a emissividade. A aproximação $\alpha = \varepsilon C_s$ é feita quando a superfície do corpo é muito pequena em relação ao meio circundante. Esta aproximação é feita nos softwares que utilizam o MEF em geral. Desta maneira, a perda de calor por radiação calculada corresponde ao calor trocado entre a parte e o meio ambiente.

As chamadas simulações termo-mecânicas são aquelas que calculam as soluções dos sistemas de equações diferenciais correspondentes ao carregamento mecânico e transferência de calor. Desta maneira, o calor gerado no sistema, da equação 2.4.2-2 é o calor de conformação:

$$\phi = \eta \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (2.4.2-4)$$

ϕ é a Dissipação, ou seja, a fração de energia mecânica gerada durante o processo e transformada em calor. Sendo ε_{ij} a deformação média local e σ_{ij} é o tensor de tensão (TRANSVALOR, 2003).

3 REPRESENTAÇÃO DA JANELA DE PROCESSO EM TIXOCONFORMAÇÃO

Ao longo da experiência do grupo de pesquisa em tixoconformação, foi possível identificar alguns defeitos frequentes nas peças obtidas. Defeitos como segregação de fase, soldagem à frio, porosidades e inclusão de óxidos são decorrentes do processo, e podem ser relacionados com a estratégia de aquecimento e o gradiente de temperatura da peça durante a conformação. Os três primeiros defeitos são provocados pela conformação de regiões com temperaturas relativamente baixas: à menores temperaturas, a fração sólida é tão grande, que impede a movimentação da fase líquida localmente. O último indica problemas na proteção da superfície da parte, e também se reflete na evolução da temperatura. Dessa maneira, entender a evolução da temperatura do tarugo ao longo do processo permite a proposição de melhorias do mesmo.

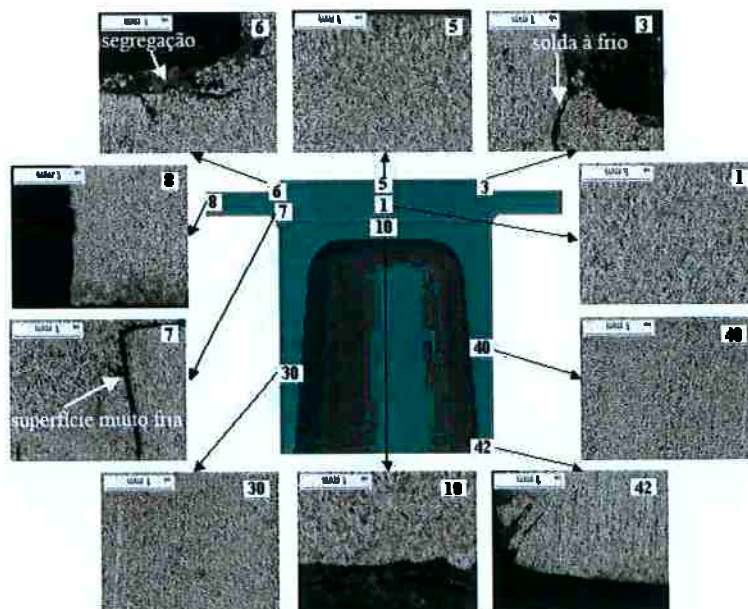


Figura 15 Micrografias dos principais defeitos encontrados no processo estudado: item 6: segregação, item 3: superfície soldada à frio, item 7: superfície fria

Devido à sua natureza, o aquecimento indutivo não pôde ser modelado em um software para simulação de forjamento, como o disponível no IBF (Forge 2). Assim, o processo foi modelado a partir do fim do aquecimento e início da abertura do forno, englobando desde o transporte do tarugo até a conformação. Algumas possibilidades de mudança de processo foram então testadas, a fim de orientar possíveis melhorias.

A escolha das melhores alternativas, ou seja, aquelas através das quais o tarugo perde menos temperatura, foi feita dentro de uma janela de temperatura obtida através da experiência do grupo. Como limite superior da temperatura, temos o valor 1280 °C, acima do qual o tarugo não agüenta seu próprio peso e não pode sequer ser transportado. Como limite inferior de temperatura, adotou-se o valor de 1240 °C com base na experiência do grupo (Vide Figura 16). Como o processo de reaquecimento é feito em três patamares, há incerteza na aplicação da curva obtida por DTA (MEUSER 2003), que tem taxa de aquecimento constante.

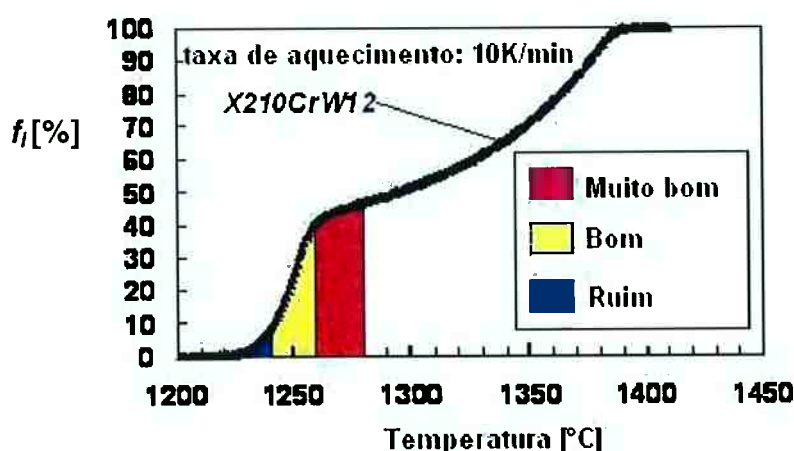


Figura 16 Representação esquemática da janela de temperatura

Juntamente com as simulações foi possível observar as temperaturas atingidas pelas ferramentas ao longo do processo.

Na escolha das mudanças a serem testadas, foram avaliadas as influências das seguintes grandezas de processo na perda de temperatura do tarugo:

- Temperatura da ferramenta: Como a transferência de calor é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre tarugo e superfície da ferramenta, a princípio, quanto menor a diferença de temperatura entre matriz e tarugo, mais devagar a troca térmica ocorrerá (Veja Equação 2.4.2-2). Entretanto à medida que a temperatura da ferramenta aumenta, esta tende a sofrer desgastes maiores: em geral, a dureza de uma ferramenta metálica é fortemente reduzida com o aumento da temperatura (PLANSEE, 2000). Dessa forma, possíveis variações de processo seriam mudanças na temperatura inicial das ferramentas de conformação. A fim de observar a variação de temperatura do tarugo com estes, ferramentas com 300 e 400 °C foram testadas.
- Velocidade do punção: Esta grandeza influencia diretamente a taxa de deformação do material, que determina em conjunto com outras grandezas a tensão de escoamento do mesmo. A duração da etapa de conformação é especialmente importante também porque a transferência de calor nesse processo tende a ser maior que em qualquer outro: A conformação leva ao aumento na área de contato entre tarugo e ferramenta, e com isso o coeficiente de transferência de calor aumenta fortemente (15000 contra 3000 W.m⁻².K⁻¹ para uma mesma ferramenta) (DANCETTE, 2005). A fim de testar mudanças na temperatura do tarugo devido a eventuais mudanças de velocidade do punção, foram testados três valores: 50, 75 (valor atual) e 100 mm/s.
- Oxidação: Como vimos anteriormente (vide item 2.2.2), a oxidação representa um desafio à tixoconformação de aço. Primeiro devido à possibilidade da formação de inclusão de óxidos, segundo porque a superfície oxidada perde calor mais rápido: em trabalhos anteriores, foi constatado que a emissividade do aço X210CrW12 à faixa de temperatura correspondente à tixoconformação varia entre 0,38 e 0,8 para superfícies oxidadas e não oxidadas, respectivamente. Segundo a equação 2.4.2-3, quanto maior a emissividade, maior a transferência de calor. Conforme citado anteriormente (vide item 2.3.3), hoje no processo tenta-se proteger a superfície da peça durante o aquecimento e durante o transporte (no último somente nas superfícies

superior e lateral), entretanto, essa proteção pode não ser efetiva. Uma variação da emissividade foi testada, a fim de observar a ação da proteção da superfície sobre a temperatura do tarugo antes da conformação.

- Material das ferramentas: Densidade, calor específico e condutividade térmica são grandezas que variam de metal para metal, e que podem influenciar a transferência de calor (Vide Tabela 5). As garras do robô, juntamente com o suporte inferior do forno de indução, são de cerâmica. Espera-se com a simulação observar se esse material realmente funciona como isolante térmico. Hoje as matrizes e o punção são de aço 1.2343. A aplicabilidade da liga de molibdênio TZM como ferramenta de processo, e os possíveis efeitos na transferência de calor foram simulados nas seguintes variantes: a) Matrizes e punção de aço-ferramenta DIN 1.2343 (como é feito hoje); b) Matrizes de 1.2343 e punção de TZM; c) Matrizes e punção de TZM.

Tabela 3 Resumo das grandezas de processo consideradas e seus valores

Grandezas de Processo	Valor
Temperatura inicial do tarugo T_0	1280 °C
Emissividade ϵ	Varia com o modelo
Coeficiente de transferência de calor convectivo (α_k)	12 W/(m ² .K)
Coeficiente de transferência de calor (α)	Varia com o modelo
Temperatura ambiente (T_∞)	25 °C
Coeficiente de atrito (μ)	0
Temperatura inicial da ferramenta (T_w)	Varia com o modelo
Velocidade do punção	Varia com o modelo

A partir dessas considerações, os processos de tixoforjamento e tixojunção foram modelados e simulados no Forge 2. Como a peça e as ferramentas são axialmente simétricas, a versão bidimensional do programa foi utilizada. As grandezas de processo assumidas como condição de contorno e as investigadas podem ser resumidas na tabela acima e no gráfico abaixo (Vide Tabela 3 e Figura 17).

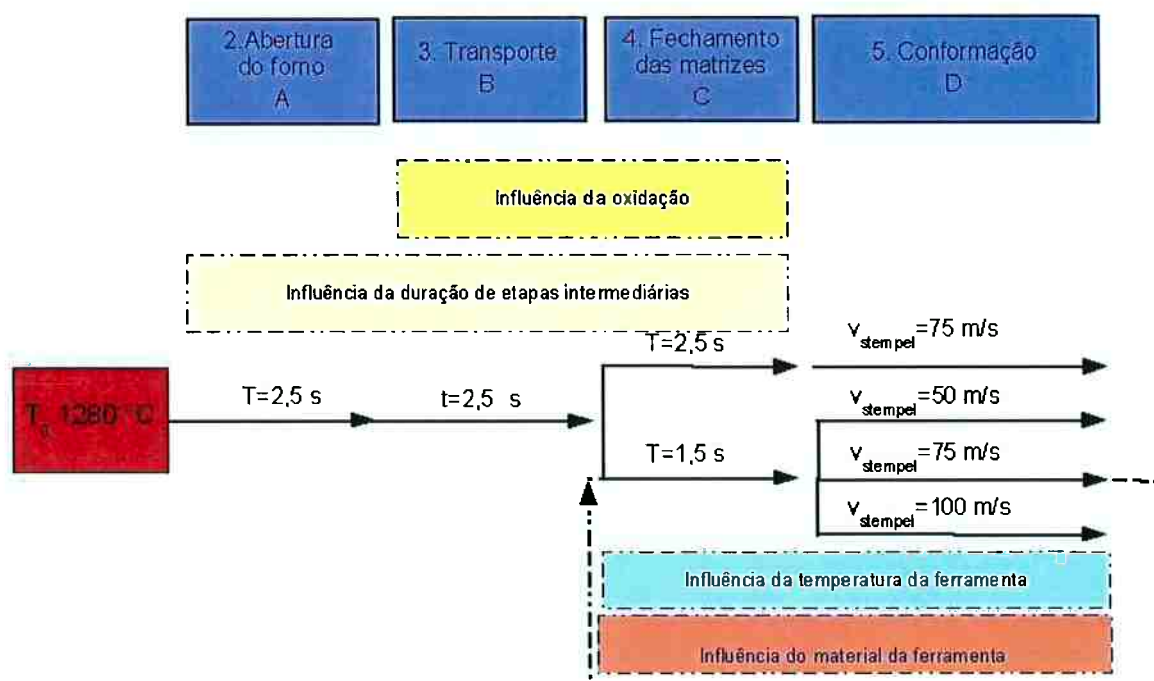


Figura 17 Esquema da sequência das simulações e das grandezas estudadas

3.1 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

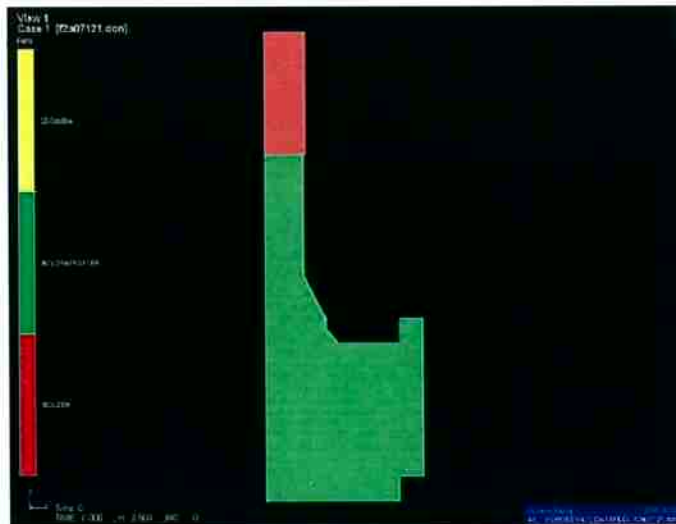
A fim de dar flexibilidade à construção dos modelos, cada etapa do processo foi modelada separadamente, e para simplificar a menção dos modelos nesse texto, cada tipo de modelo foi nomeado com uma letra. Neste item alguns detalhes do modelamento serão expostos para garantir sua reprodutibilidade.

Tabela 4 Etapas do processo e seus modelos

Ordem da etapa	Etapa do Processo	O que acontece	Duração [s]	Modelo
1 ^a	Abertura do forno	O suporte é deslocado para baixo	2,5	A
2 ^a	Transporte do tarugo	O tarugo é transportado pelo robô	2,5	B
3 ^a	Fechamento das Matrizes	O tarugo é suportado pelo punção enquanto as matrizes são fechadas	1,5	C
4 ^a	Conformação	O punção sobe e a cavidade é preenchida	Varia	D

Modelo A

A temperatura inicial do tarugo é modelada como 1280 °C e homogênea para simplificar a análise (A validade dessa hipótese será discutida no item 4). Como a cerâmica é aquecida localmente ao longo da etapa A, a temperatura na cerâmica na área próxima à superfície de contato foi tomada como 1120 °C, e 6 mm abaixo, assumiu-se que a temperatura da cerâmica seria 300 °C (vide item 4 e Figura 18).



Condições de contorno	α [W/(m ² .K)]	ϵ
Tarugo-ar	12	0,38
Tarugo-suporte	1500	0

Figura 18 Ilustração do modelo A e suas condições de contorno

Modelo B

Aqui o transporte do tarugo pelo robô é simulado. O tarugo é importado da simulação do modelo anterior, e assim já apresenta um gradiente de temperatura, enquanto as garras do robô são simuladas com a temperatura homogênea de 25 °C. (temperatura ambiente). Conforme citado anteriormente, as garras do robô são de silicato de cálcio, e por isso, o coeficiente de transferência de calor na superfície lateral é o mesmo (Vide Figura 19). Para avaliar os efeitos da oxidação no tarugo, que possivelmente ocorre na superfície inferior do mesmo (lembrando que na parte de cima é aplicado gás argônio), o valor da emissividade foi variado entre 0,38 e 0,8 (caso sem oxidação e caso com, respectivamente) (DANCETTE, 2005).

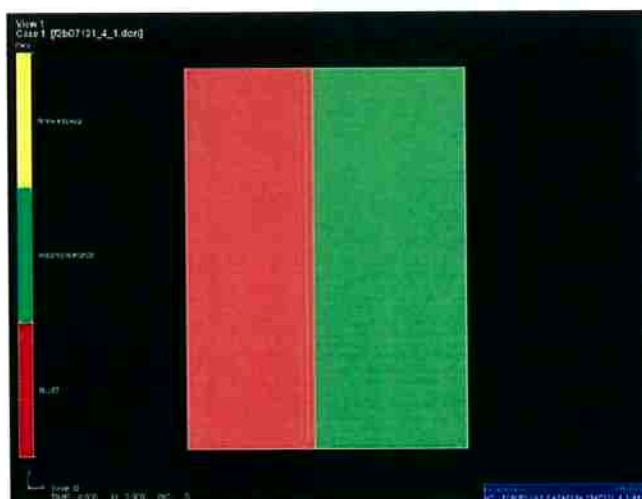
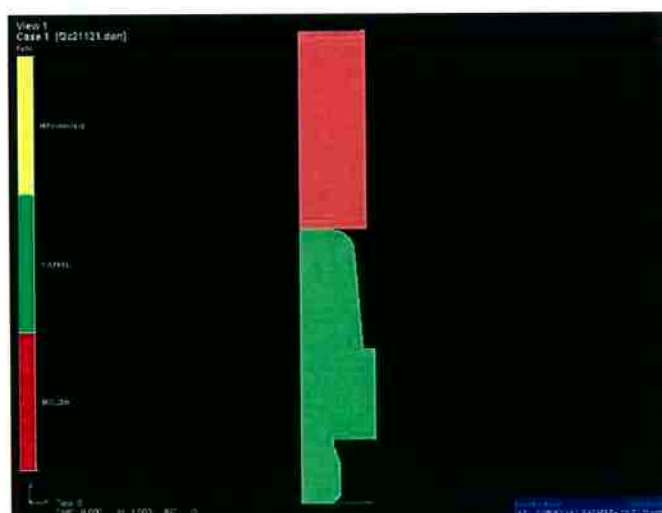


Figura 19 Ilustração do modelo B e suas condições de contorno

Condições de contorno	α [W/(m ² .K)]	ϵ
Tarugo-ar	12	de 0,38 a 0,8
Tarugo-garra do robô	1500	0

Modelo C

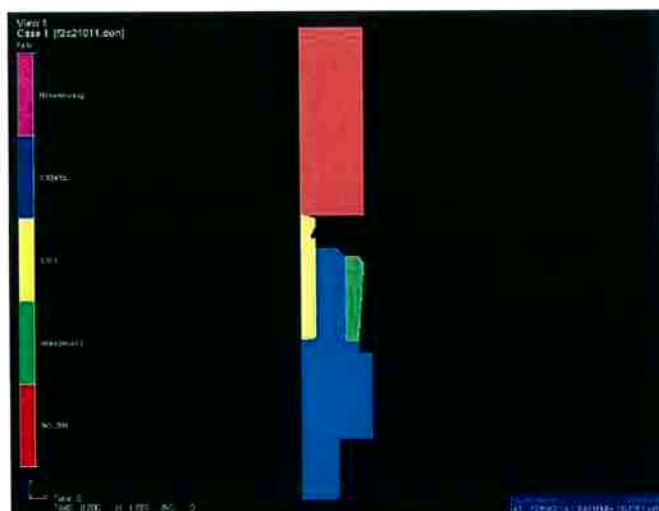
No processo real, o robô solta o tarugo na cavidade da matriz inferior. Este modelo representa o tempo de espera quando o tarugo acabou de descer e enquanto as matrizes são fechadas (Vide Figura 20). Consideramos aqui que o tarugo está perfeitamente na vertical, suportado pelo punção, e assim não toca as matrizes. A temperatura do punção no processo atual é 300 °C, e o gradiente inicial de temperatura do tarugo foi importado da simulação anterior. Os efeitos da temperatura do punção, do material, da duração do processo e da oxidação no tarugo foram analisados através de variações no modelo.



Condições de Contorno	α [W/(m ² .K)]	ϵ
Tarugo-ar	12	de 0,38 a 0,8
Tarugo - punção	3000	0

Figura 20 Ilustração do modelo C para tixoforjamento e suas condições de contorno

No caso da tixojunção, o punção tem geometria diferente, e algumas outras peças já estão encaixadas. Assim, consideramos que o tarugo está apenas em contato com o pino no começo da simulação (Vide Figura 21).

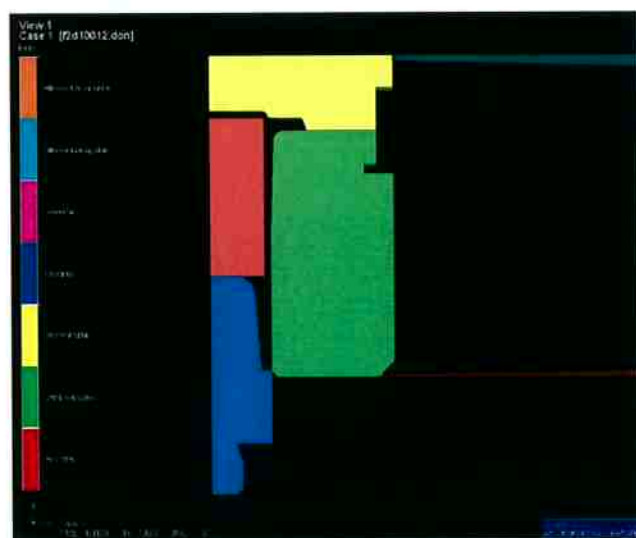


Condições de contorno	α [W/(m ² .K)]	ϵ
Tarugo-ar	12	0,38
Tarugo-pino	3000	0

Figura 21 Ilustração do modelo C para tixojunção e suas condições de contorno

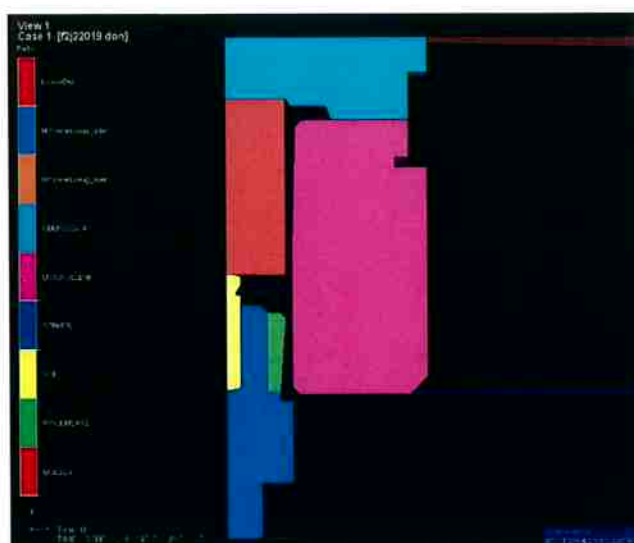
Modelo D

As matrizes já estão fechadas, e o punção sobe, conformando a peça (Vide Figura 22). O coeficiente de calor foi considerado 15000 W/(m².K). As geometrias do punção, tarugo e peças adicionais (no caso da tixojunção) foram importadas da simulação do modelo C (Vide Figura 23). As temperaturas iniciais das matrizes foram consideradas 300 °C, e variações na velocidade do punção, no material das matrizes e na duração da etapa C são analisadas. O atrito foi considerado nulo.



Condições de contorno	α [W/(m ² .K)]	ϵ
Tarugo-ar	-	-
Tarugo-ferramentas	15000	0

Figura 22 Modelo D para tixoforjamento e suas condições de contorno



Condições de contorno	α [W/(m ² .K)]	ϵ
Tarugo-ar	-	-
Tarugo-partes a serem unidas	15000	0
Tarugo-ferramentas	15000	0

Figura 23 Ilustração do modelo D para tixojunção e suas condições de contorno

3.2 OBTENÇÃO DE DADOS MATERIAIS

As simulações termo-mecânicas requerem uma série de dados materiais para serem realizadas. Estes dados foram investigados e recolhidos em trabalhos anteriores (SEIDEL, 2006 e DANCETTE, 2005). A tabela abaixo permite a visualização e comparação entre essas propriedades. Os valores inseridos no software estão no ANEXO A (Vide Tabela 5). As constantes que foram consideradas como dependentes da temperatura têm a sua faixa de valores mostrada. Dentre essas propriedades, podemos destacar o módulo de Young e o calor específico.

Como a parte elástica da deformação do tarugo não é considerada no software em questão (KOBAYASHI, 1998), esse valor não é fornecido para o X210CrW12, mas sim as curvas de escoamento a quente. Estas foram obtidas em trabalhos anteriores através de uma nova técnica de ensaio de compressão (DANCETTE, 2005 e SHIMAHARA, 2006). Esses ensaios foram realizados para taxas de deformação iguais a 0,1, 1,0, e 10 s⁻¹, e temperaturas iguais a 965, 1020, 1053, 1101 e 1145 °C. As curvas levantadas foram inseridas por tabela no Forge 2.

O calor específico teve de ser adaptado para representar de maneira realística o resfriamento do tarugo: através de termopares e simulações, foram observadas as transformações de fase presentes no resfriamento ao ar regressivamente (Vide Anexo A). Como o Forge 2 não permite a inserção do calor de transformação

separadamente, este foi adicionado aos valores de calor específicos obtidos por ensaios de calorimetria DSC (Differential Scanning Calorimetry).

Tabela 5 Propriedades físicas dos materiais aplicados

	Tarugo	Parte a ser unida (anel)	Segunda parte a ser unida (pino)	Cerâmica isolante	Matriz e punção (variante)	Matriz e punção (no processo atual)
Grandeza	X210CrW12	CuCo1NiBe	CuSn12-C	Silicato de Cálcio	TZM	1.2343
α_k (Convecção) (W/(m ² K))	12	-	-	10	-	-
ϵ	0,38-0,8	0,7	0	0,8	0,8	0,85
α_d (Dilatação) (1/K)	1,05-1,73 E-5	1,30-3,33 E-5	1,78-1,89 E-5	6,00 E-7	5,3-6,5 E-6	1,18-1,29 E-5
ρ (kg/m ³)	6885-7760	8800	8860	1900	10200	7799,18-7326,02
c_p (J/(kg.K))	459-794	435	376-395	1200	250-440	375-668,8
λ (W/(m.K))	21,2-39	260	55-70	0,42-1,02	126-86	35-23
Modulo de Young (N/mm²)	-	1180 – 500 E2	9,7-8,5 E4	1,00 E4	2,67 E5	1,82 E5
Coeficiente de Poisson	-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Como citado no item 3.1, o material do tarugo é o aço de trabalho a quente X210CrW12, o anel e o pino a serem unidos no processo de tixojunção são de ligas de cobre. Quanto às ferramentas, o material do suporte do forno e da garra do robô é o silicato de cálcio, as matrizes e o punção são de aço 1.2343 atualmente, mas variantes com TZM substituindo esse aço serão testados.

4 MEF-EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA APARTIR DO AQUECIMENTO

Para atingir a temperatura de 1280 °C objetivada, o tarugo é aquecido em três etapas. Primeiramente a potência de 35 kW, por cerca de 90 s a 1220 °C. Em seguida, o material é fundido por 25 s até uma temperatura de 1280 °C. Finalmente, a temperatura é homogeneizada por 40 s (Vide Gráfico 1).

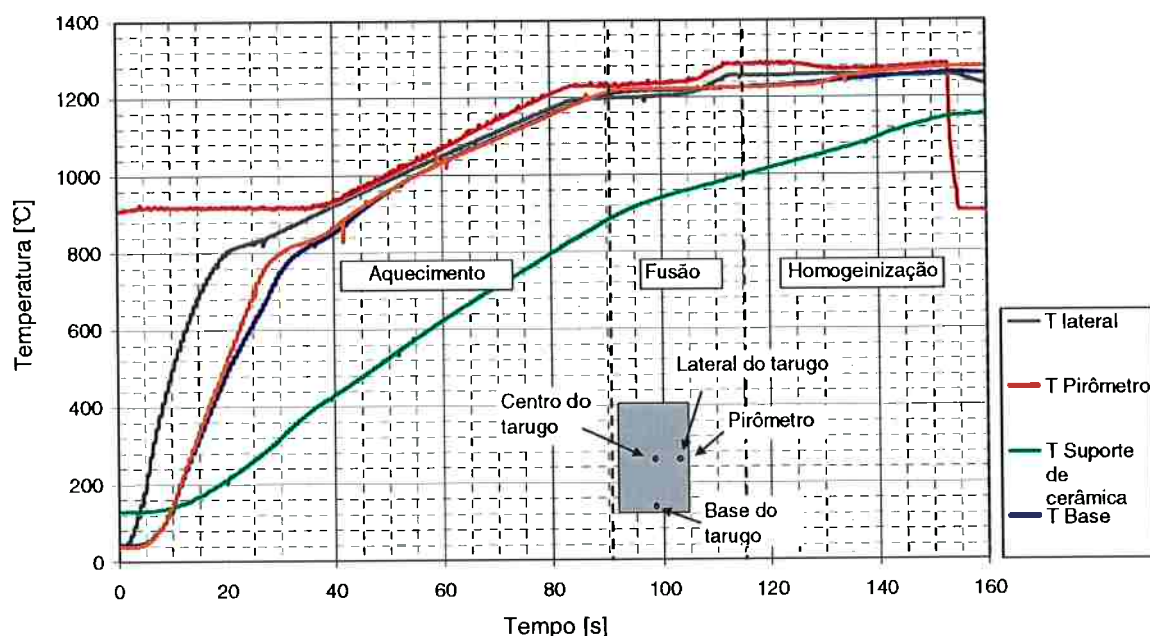


Gráfico 1 Resultados experimentais da evolução da temperatura do tarugo e do suporte ao longo do aquecimento

Neste ensaio foram colocados termopares e um pirômetro fixo ao forno de indução (isso explica por que a temperatura cai tão rapidamente após a abertura do forno: o tarugo é deslocado para baixo). A temperatura logo após o aquecimento é ampliada no Gráfico 2. Observa-se uma diferença de 12 °C entre a temperatura lida com o termopar no centro do tarugo e o da base do tarugo, e 18 °C entre o centro e a lateral. Como citado anteriormente, não foi possível simular o aquecimento indutivo, com isso a temperatura inicial no tarugo é tida como homogênea e igual a 1280 °C.

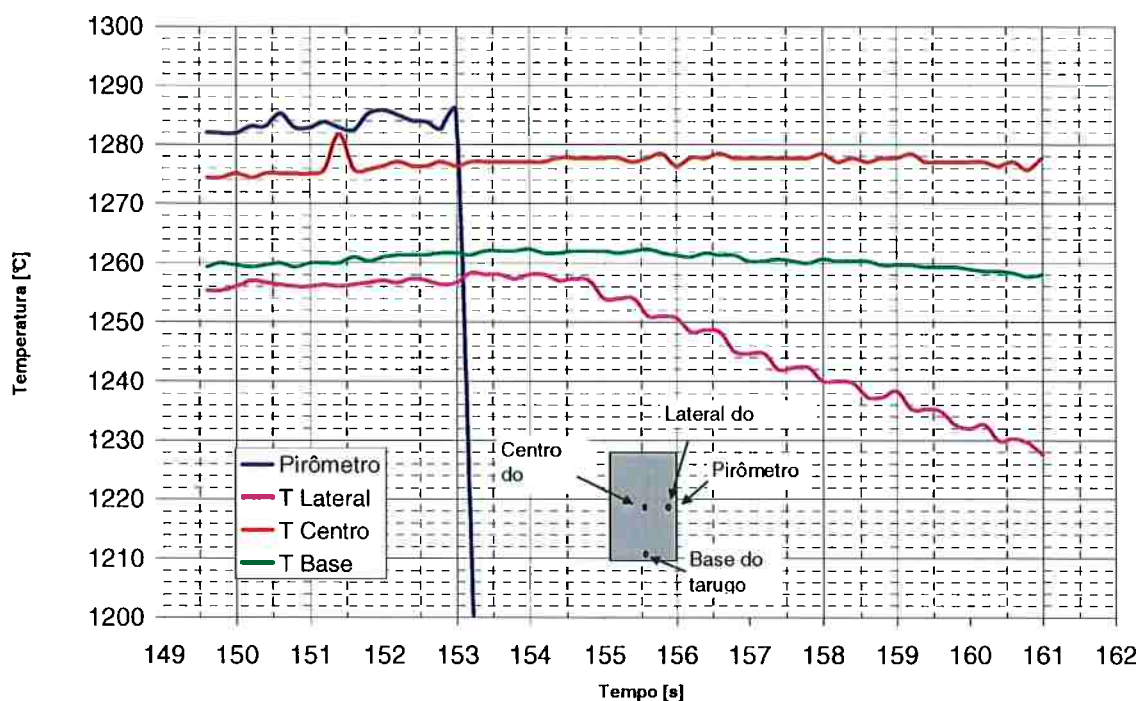


Gráfico 2 Ampliação dos resultados experimentais da evolução da temperatura do tarugo e do suporte ao longo do aquecimento ampliado

Os resultados de todas as simulações foram tomados quantitativamente por sensores colocados no tarugo ao longo das simulações: os do centro, da lateral, da base do tarugo, e outro nomeado pirômetro, que mostra o que um pirômetro apontado para o centro da superfície lateral indicaria caso fosse utilizado em todo o processo. Em geral, os resultados do modelo A não concordam com a medida experimental exceto pelos sensores do centro. Isso pode ser considerado efeito do gradiente térmico gerado no aquecimento: note que a peça ao sair do forno já tem um gradiente térmico (a abertura se dá ao 153 s). Entretanto, como o modelo A será o mesmo para todas as variantes de processo simulada, é possível avaliar potenciais melhorias de processo ainda com as limitações dos modelos, pois essa hipótese será aplicada em todos os modelos. Os resultados dos sensores do centro são os mais próximos do experimental.

4.1 INFLUÊNCIA DA OXIDAÇÃO

No processo real, foi observada oxidação na superfície do tarugo ao longo das etapas de transporte e fechamento das matrizes (Modelos B e C). Em trabalhos anteriores foram obtidos diferentes valores de emissividade do tarugo (Vide Tabela 6).

Tabela 6 Valores de emissividade encontrados em trabalhos anteriores para o X210CrW12 no estado semi-sólido

Temp. [°C]	Ar	Argônio
1000	$\varepsilon = 1,0$	$\varepsilon = 0,85$
1140	$\varepsilon = 1,0$	X
1200	$\varepsilon = 0,82$	$\varepsilon = 0,4$
1280	Não disponível	$\varepsilon = 0,4$

A fim de observar a influência desta na perda de calor do tarugo, variantes representando “melhor caso” e “pior caso” em termos de oxidação foram simuladas (Vide Figura 17). Os valores de emissividade correspondentes ao caso oxidado (0,8) foram aplicados às faces em que acreditava-se que havia oxidação.

Tabela 7 Simulações para representação da influência da oxidação

Nome do modelo	Parâmetro	Face superior	Lateral	Face inferior	Tamanho do elemento (mm)	ε Ferramenta
F2A07123	α (W/(m ² K))	12	12	1500	1,45772	0
	ε	0,38	0,38	0		
F2B07121_4_1 (Melhor caso)	α (W/(m ² K))	12	1500	12	1,45772	0
	ε	0,38	0	0,38		
F2B19121 (Pior caso)	α (W/(m ² K))	12	1500	12	1,45772	0
	ε	0,38	0	0,8		
F2C07126_3 (Melhor caso)	α (W/(m ² K))	12	12	12-3000	1,45764	0,85 (aço)
	ε	0,38	0,38	0-0,38		
F2C19121 (Pior caso)	α (W/(m ² K))	12	12	12-3000	1,45764	0,85 (aço)
	ε	0,8	0,8	0-0,8		

Os resultados da simulação no modelo B podem ser observados na Figura 24, onde o tarugo e a garra do robô estão representados. No “melhor caso”, o lado inferior do tarugo, com emissividade igual a 0,38 fica entre 1216-1264 °C, enquanto no “pior caso” (lado superior com $\varepsilon = 0,38$ e lado inferior com $\varepsilon = 0,8$), a temperatura varia entre 1208 e 1256 °C. O resultado é razoável: como a transferência de calor é muito maior na superfície em contato com a ferramenta (devido ao maior coeficiente de transferência de calor), as temperaturas na mesma são menores, atingindo o mínimo nos cantos do tarugo. O que não está claro é a diferença de temperatura entre os cantos superiores direito, que têm os mesmos parâmetros.

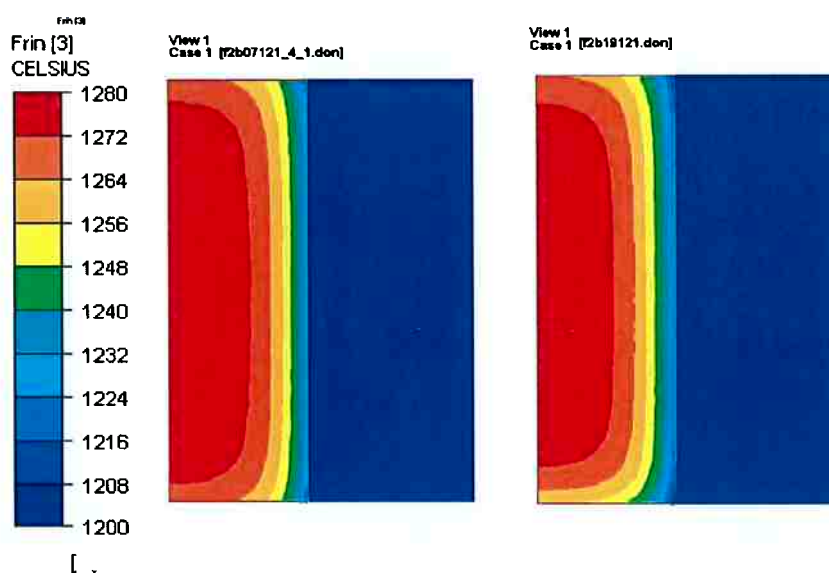


Figura 24 Influência da oxidação no transporte do tarugo, “melhor caso” à esquerda e “pior caso” à direita

Os tarugos de ambas foram então importados na construção dos respectivos modelos seguintes para a simulação de “melhor caso” e “pior caso” na etapa C. O resultado é coerente: como o coeficiente de transferência de calor é maior entre tarugo e ferramenta que com o ar (3000 versus $12 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$), as menores temperaturas são encontradas no lado inferior do tarugo (Vide Figura 25) e a diferença entre as temperaturas do centro e da base do tarugo é de cerca de 58 °C. Ao final das simulações do modelo C, podemos concluir que as temperaturas na base, e na lateral do tarugo são de fato menores para o pior caso: a diferença é de 2 °C na base, 6 °C no pirômetro e 2 °C na lateral (Vide Gráfico 2).

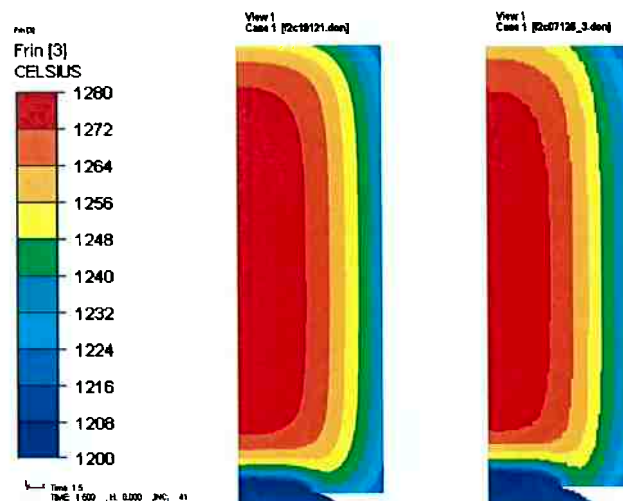


Figura 25 Influência da oxidação no tarugo durante o fechamento das matrizes melhor caso à direita, pior caso à esquerda

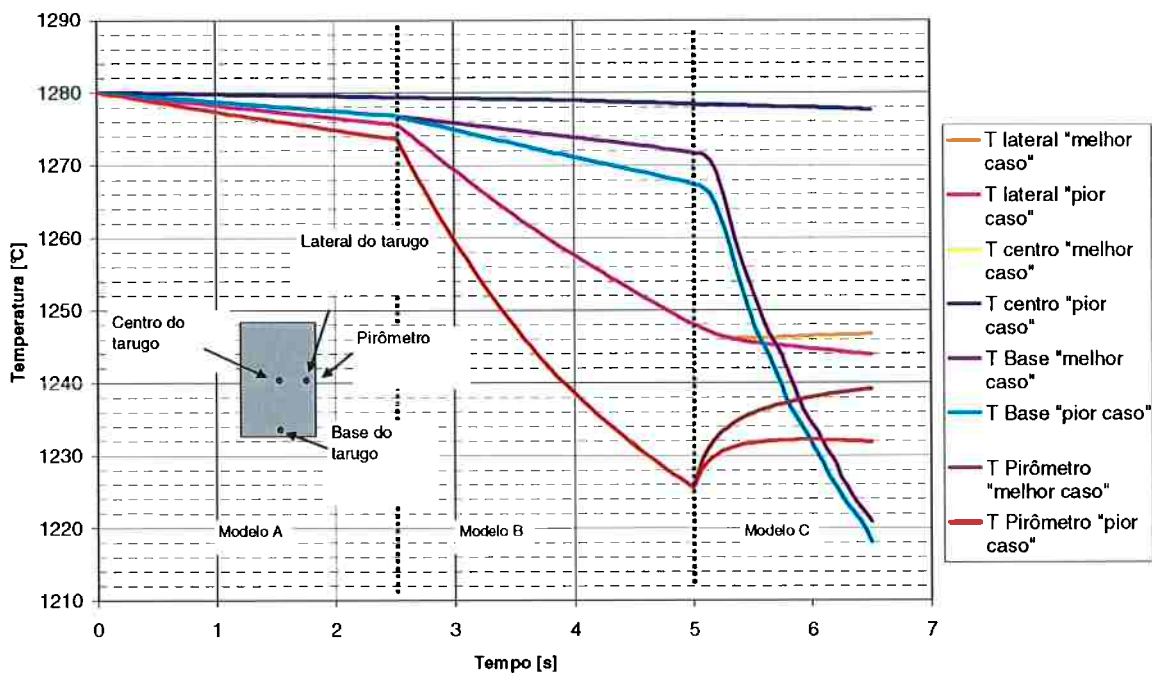


Gráfico 3 Comparação entre a evolução da temperatura nos sensores entre o pior e melhor caso, em termos de oxidação

Nos modelos seguintes, a variante “melhor caso” foi simulada, e outros parâmetros foram variados. O modelo C para tixojunção foi simulado também com os parâmetros do melhor caso. Nele não foram feitas variações, apenas o processo

atual foi ilustrado. Os resultados após a etapa C de tixojunção mostra que menos calor é extraído nessa etapa, em relação ao modelo C para tixoforjamento. Uma possível explicação está no fato de que a área de contato entre o tarugo e o punção são bem menores nesse caso.

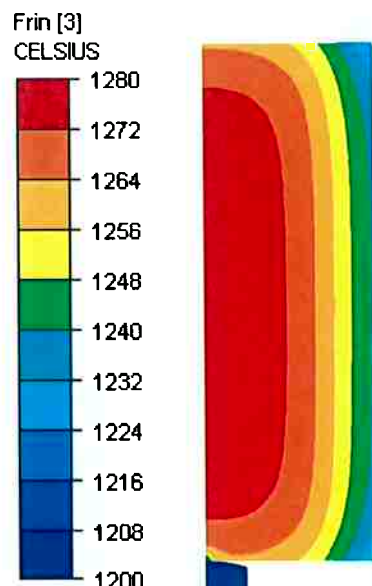


Figura 26 Gradiente de temperatura do tarugo após o fechamento das matrizes e antes da tixojunção

4.2 INFLUÊNCIA DA DURAÇÃO DE ETAPAS INTERMEDIÁRIAS

Como mencionado no item 3, a influência da duração das etapas foi analisada. Uma sequência principal foi simulada, com a duração de 2,5 s nas etapas A, B e 1,5 s na C. Uma outra variante com a duração de 2,5 s na etapa C foi simulada a fim de observar se a temperatura cairia muito em um segundo a mais do processo. As condições de contorno com relação à emissividade foram tomadas como as mesmas correspondentes ao “melhor caso”. 2.

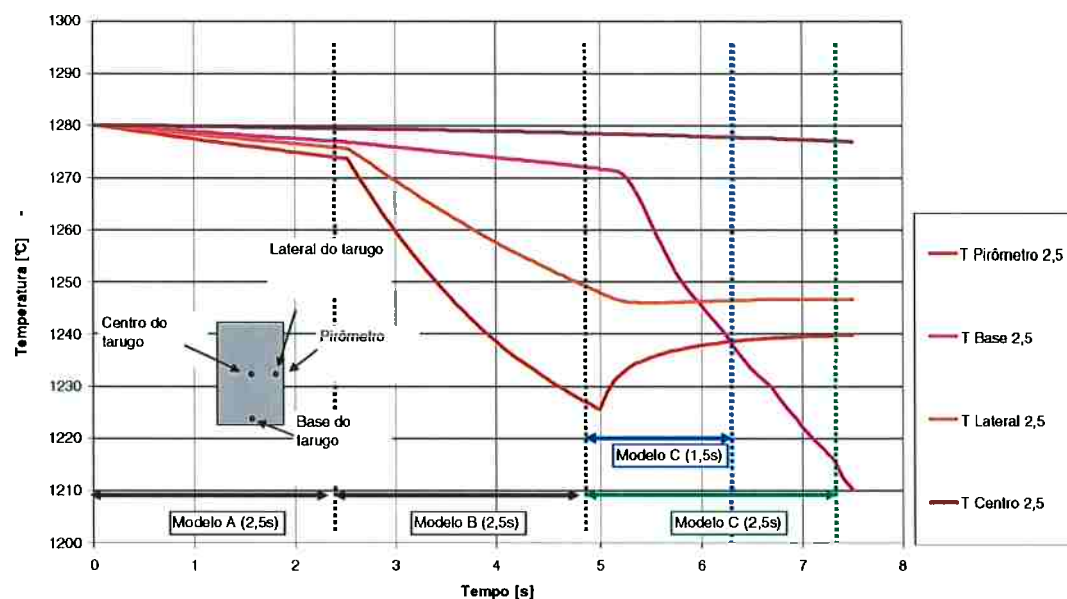


Gráfico 4 Evolução da temperatura com o tempo

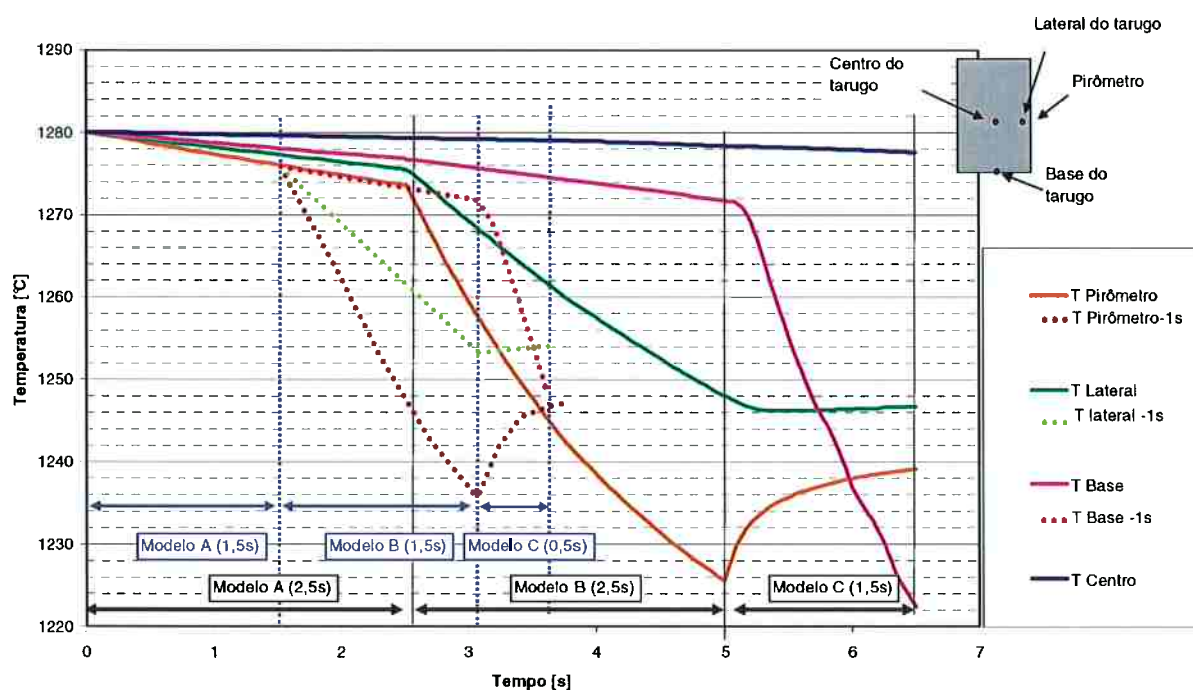


Gráfico 5 Evolução estimada da temperatura com etapas intermediárias menores

O resultado quantitativo da simulação dessas duas variantes é dado no Gráfico 4, e o resultado qualitativo da redução de um segundo em cada etapa (essa possibilidade não foi simulada) é dado no Gráfico 5.

No modelo A foi observada uma diferença de cerca de 4 °C na extremidade superior direita do tarugo entre o tempo 1,5 e 2,5 s (Vide Figura 27). Isso indica que nesse modelo o tarugo perde mais calor com o ar que com a cerâmica. O tarugo dessa simulação, ou seja, após 2,5 s foi então importado no modelo B. As perdas de calor no modelo B são maiores junto à ferramenta, e é nessa superfície que a temperatura diminui 8 °C com 1 s (Vide Figura 28). Vê-se aqui o efeito da temperatura da garra do robô: o material é o mesmo do suporte, porém o primeiro está à temperatura ambiente, enquanto o segundo está à 1120 °C.

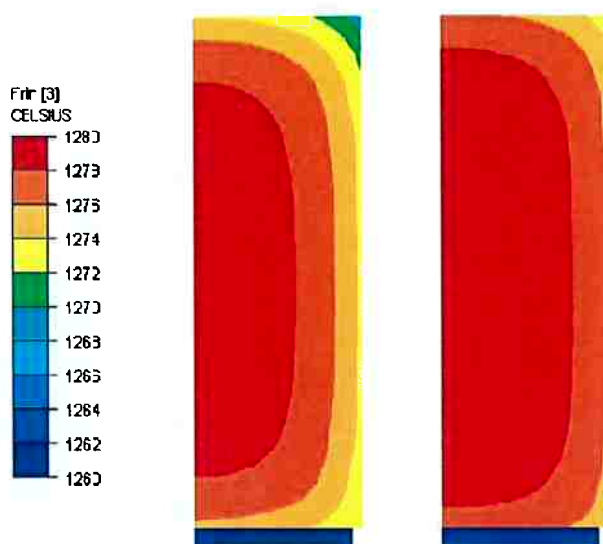


Figura 27 Gradiente de temperatura final após 1,5 s à direita e 2,5 s à esquerda no modelo A

O modelo C foi então simulado em duas durações diferentes, produzindo assim duas geometrias finais a serem importadas na construção dos modelos D. A diferença entre os dois tarugos finais é de cerca de 24 °C na base do tarugo, mas não é possível observar essa diferença na figura 4.2-3 (Vide Gráfico 4.).

No mesmo gráfico observa-se também que, apesar do tarugo perder temperatura devido ao contato com o punção metálico, nos sensores pirômetro e lateral a

condução de calor do centro para essa região é o efeito mais importante, a ponto da temperatura aumentar. Isso também é observado nas simulações para verificação da influência da oxidação.

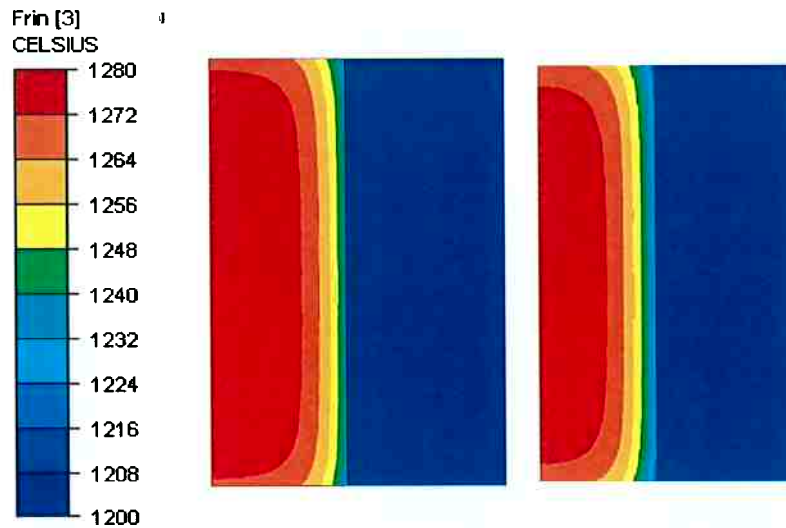


Figura 28 Gradiente de temperatura logo após 1,5 s à esquerda e 2,5 s à direita no modelo B

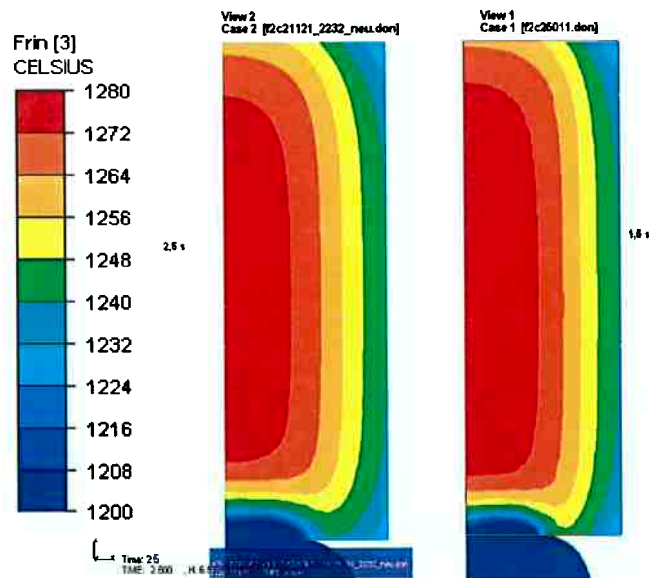


Figura 29 Gradiente de temperatura após modelo C com duas durações: 1,5 s à direita e 2,5 s à esquerda

4.3 INFLUÊNCIA DO MATERIAL DAS FERRAMENTAS

A fim de observar a influência dos materiais das ferramentas na conformação foram simuladas três variantes de combinações de ferramentas para dois materiais: TZM e 1.2343. Como no modelo C apenas o punção e o tarugo são representados, apenas duas variantes foram simuladas, mantendo o tempo, a emissividade e a temperatura inicial da ferramenta constantes (300 °C), (Vide Tabela 8).

Observa-se no Gráfico 6 e na Figura 30 que não houve mudança significativa na temperatura do tarugo, mesmo na base, devido ao material da ferramenta. Por outro lado, observa-se que a distribuição das temperaturas no punção muda bastante (Vide Figura 31). Por apresentar maior difusividade, o punção de TZM apresentou uma maior área aquecida, mas também temperaturas menores que o punção de aço: este chega a 500 °C na área de contato, o que pode levar à dano da ferramenta.

Tabela 8 Parâmetros das simulações para avaliação da influência do material das ferramentas

Nome do modelo	Parâmetro	Face superior	Lateral	Face inferior	Tamanho do elemento (mm)	ϵ Ferramenta
Modelo A (F2A07123)	α (W/m ² K)	12	12	1500	1,45772	0
	ϵ	0,38	0,38	0		
Modelo B (F2B07121_4_1)	α (W/m ² K)	12	1500	12	1,45772	0
	ϵ	0,38	0	0,38		
Modelo C Aço (F2C21121)	α (W/m ² K)	12	12	12-3000	1,45764	0,85
	ϵ	0,38	0,38	0-0,38		
Modelo C TZM (F2C21123_TZM)	α (W/m ² K)	12	12	12-3000	1,45764	0,0
	ϵ	0,38	0,38	0-0,38		

Assim, o TZM pode ser considerado de interesse pois não extrai mais calor do tarugo em 1,5 s, e o punção desse material apresenta menores temperaturas, e por isso pode apresentar maior dureza e durabilidade.

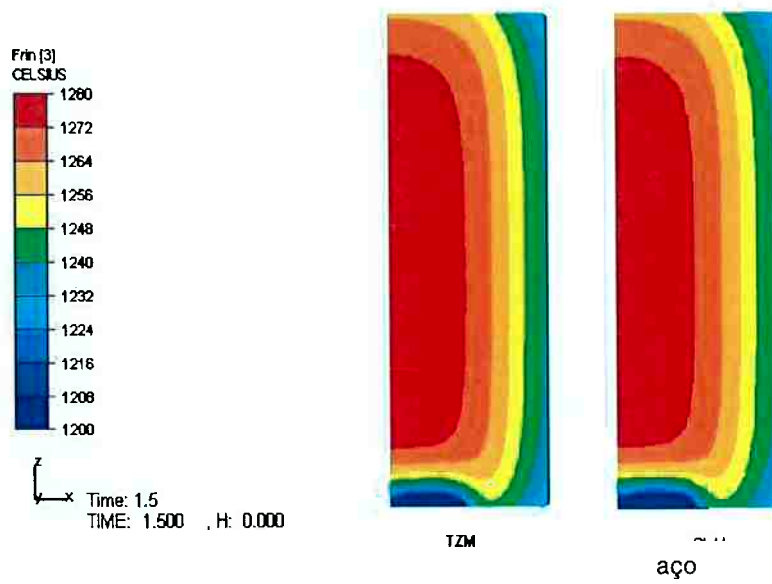


Figura 30 Influência do material da ferramenta no gradiente de temperatura do tarugo

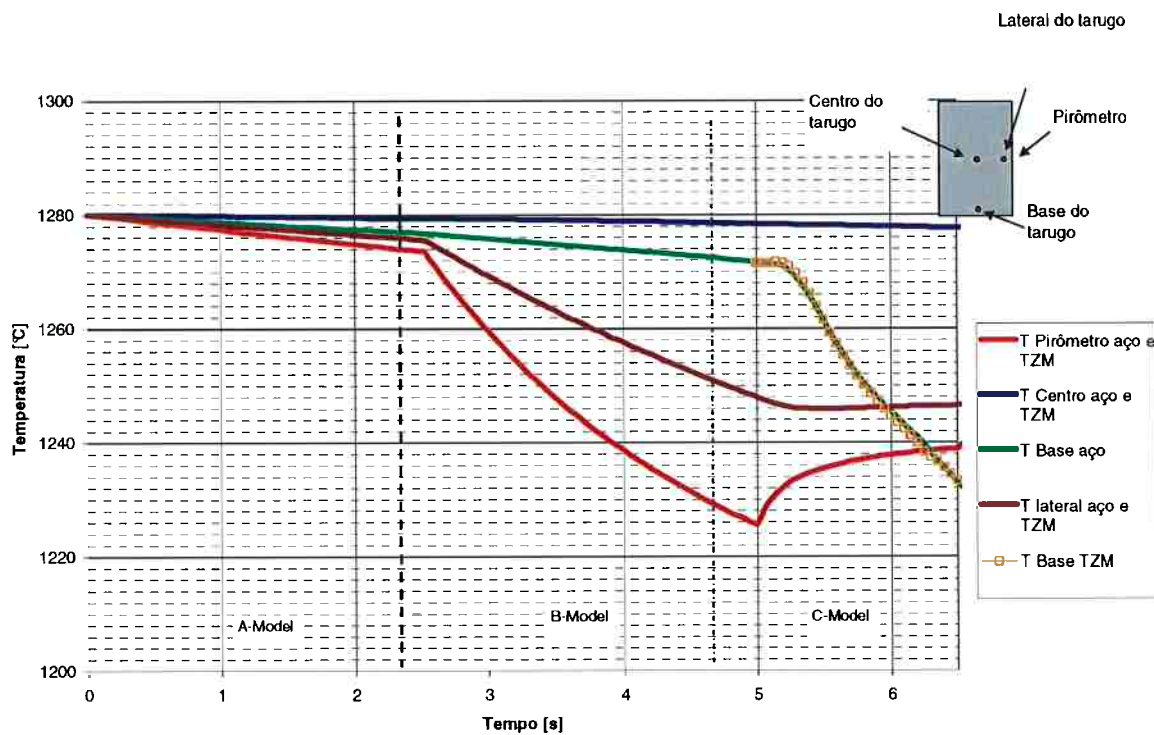


Gráfico 6 Evolução da temperatura nos sensores com diferentes materiais no punção

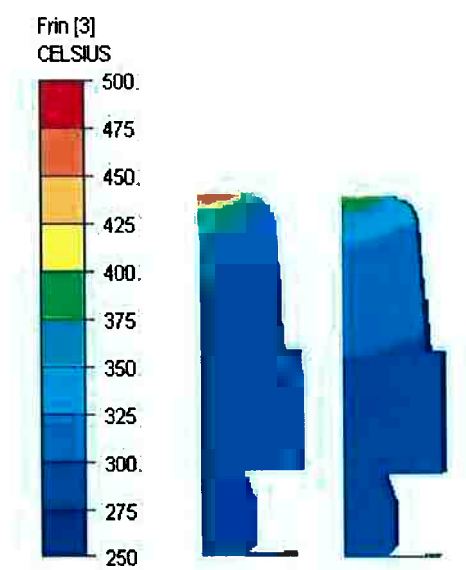


Figura 31 Distribuição da temperatura nos punções de aço e de TZM

4.4 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DA FERRAMENTA

Como visto no item 2.4.2, a taxa de transferência de calor é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre um tarugo e o seu meio circundante. A fim de observar a influência da temperatura da ferramenta na perda de calor, a variante principal foi simulada tendo as temperaturas das ferramentas maiores que a do processo atual: 400 °C (entenda-se matrizes e punção de 1.2343, etapas intermediárias seguindo os mesmos parâmetros do “melhor caso”, vide item 4.1). Os parâmetros dos modelos estão listados na Tabela 9. Os resultados correspondentes à etapa de fechamento das matrizes são apresentadas neste item, enquanto as correspondentes à etapa de conformação no capítulo 5. Comparando os resultados dos modelos com punção a 300 e a 400 °C, não é possível observar uma grande diferença entre os gradientes de temperatura. Entretanto, no Gráfico 4.4-1 é possível observar um aumento de cerca de 4 °C no caso com punção à maior temperatura.

As simulações também mostram que o punção que começa com 400 °C atinge até cerca de 650 °C após 1,5 s em contato com o tarugo, enquanto o punção a apenas 300 °C chega a menos de 500 °C (Vide Figura 33). Esses gradientes foram importados na construção dos modelos para a conformação

Tabela 9 Condições de contorno das simulações para verificação da influência da temperatura da ferramenta

Nome do modelo	Parâmetro	Face superior	Lateral	Face inferior	T da ferramenta (°C)
Modelo A (F2A07123)	α (W/m2K)	12	12	1500	1120
	ϵ	0,38	0,38	0	
Modelo B (F2B07121_4_1)	α (W/m2K)	12	1500	12	25
	ϵ	0,38	0	0,38	
Modelo C 300 (F2C21121)	α (W/m2K)	12	12	12-3000	300
	ϵ	0,38	0,38	0-0,38	
Modelo C 400 (F2C2201_400)	α (W/m2K)	12	12	12-3000	400
	ϵ	0,38	0,38	0-0,38	

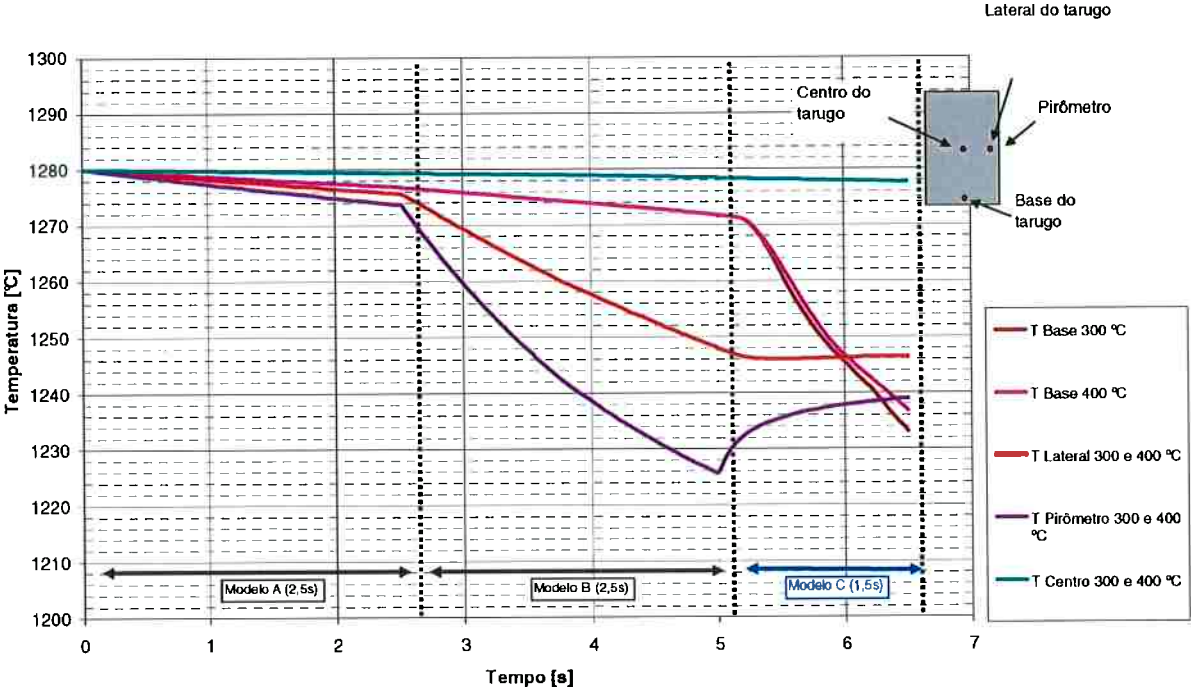


Gráfico 7 Influência da temperatura do punção nos sensores do tarugo

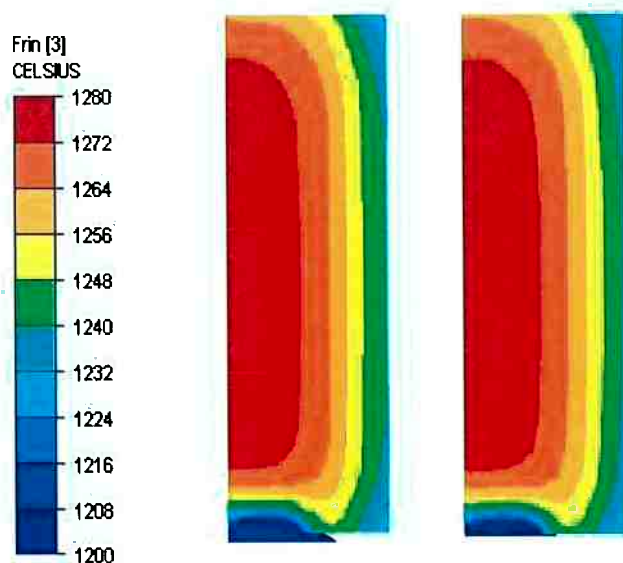


Figura 32 Influência da temperatura do punção no tarugo: 300 °C à esquerda e 400 °C à direita

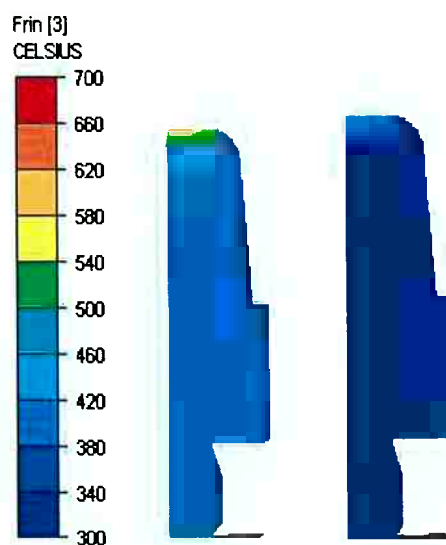


Figura 33 Gradiente de temperatura no punção após etapa de fechamento das matrizes e antes da conformação: à esquerda com 300 °C e à direita com 400 °C

4.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De acordo com a janela de processo definida no item 3, podemos esquematicamente representar as áreas com temperatura dentro e fora dessa janela como “semi-sólido” e “sólido”, respectivamente. A simulação do resfriamento sofrido

pelo tarugo no processo atual mostra que antes da conformação já existe uma significativa área praticamente no estado sólido. As maiores perdas de calor foram verificadas nas superfícies em contato com as ferramentas nos modelos B e C, mostrando que a radiação não é o fenômeno responsável pela maior perda de calor, mas sim a transferência de calor entre tarugo e ferramenta.

Com relação à duração das etapas anteriores, é possível afirmar que o tarugo estaria na janela de processo determinada (acima de 1240 °C) após o modelo B, caso todas as etapas fossem 1 s mais rápidas.

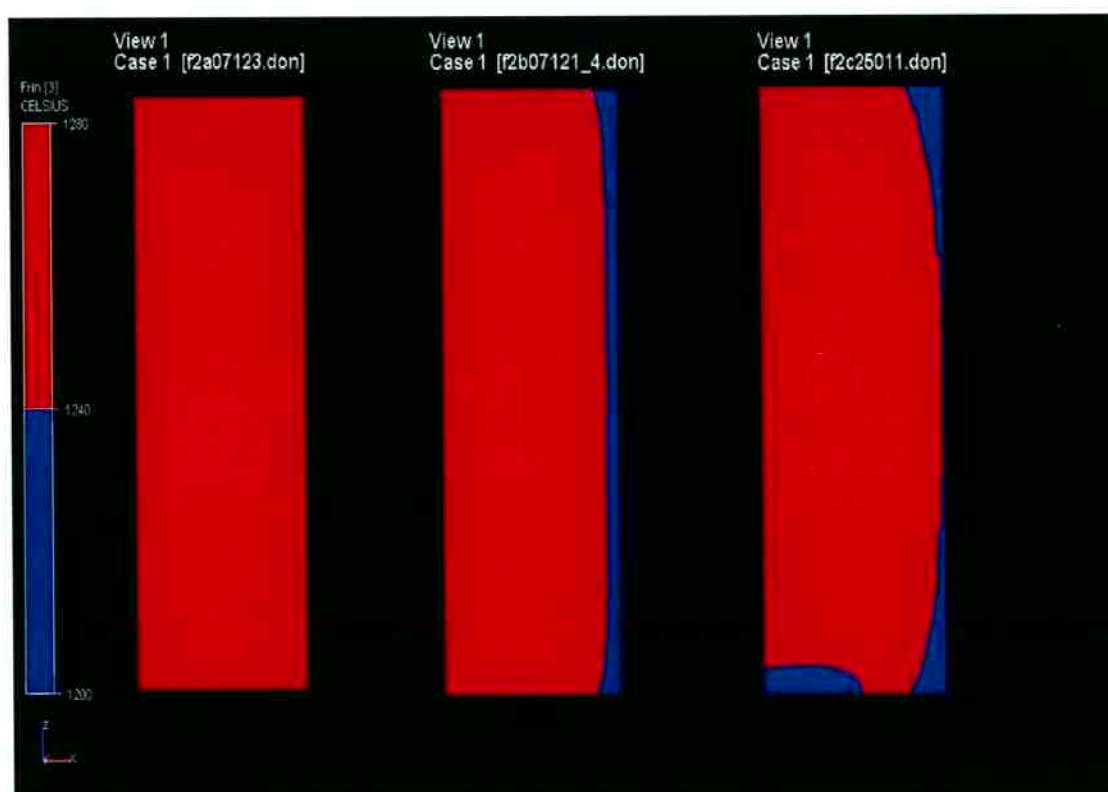


Figura 34 Representação esquemática do resfriamento do tarugo ao longo do processo, antes da conformação: vermelho é a área dentro da janela de temperatura adequada, azul é abaixo dela

Caso o punção fosse aquecido a 400 °C antes da conformação (a temperatura atual é de 300 °C), uma diferença de apenas 4 °C seria observada na base do tarugo, o que pode não compensar frente à perda de dureza na superfície da ferramenta e o desgaste a ela relacionado (PLANSEE, 2000). A variante com temperatura maior acaba assim não compensando para punção de aço. Futuramente, poderia ser simulado a mesma variante para punção de TZM: A simulação da etapa C com o

punção dessa liga de molibdênio apresenta menores temperaturas que no punção de aço, e indica que ele não extrai significativamente mais calor do tarugo apesar da sua alta difusividade em 1,5 s em contato.

5 MEF-CONFORMAÇÃO ATRAVÉS DE TIXOFORJAMENTO

Três possíveis melhorias na etapa D foram testadas através de simulação. As condições de contorno dos modelos foram citadas no item 3. A fim de obter dados mais detalhados que permitissem comparação, a temperatura foi tomada em dois pontos críticos da rede através de sensores de coordenadas fixas (referencial Euleriano, ou seja, fixado nas matrizes): um na extremidade direita (ponto 1) e outro extremidade inferior (ponto 2). Os mesmos sensores considerados no capítulo 4 (com referencial Lagrangiano, ou seja, fixado no material, porém independente das coordenadas) foram também considerados, a fim de avaliar o que aconteceria com aquela região do material durante a conformação.

5.1 INFLUÊNCIA DA DURAÇÃO DAS ETAPAS

A influência da duração da etapa C na temperatura do tarugo pôde ser observada (Vide Figura 35). A diferença é significativa: a área correspondente à faixa de temperatura entre 1280 e 1272 °C é muito menor após 2,5 s que após 1,5 s. As condições de contorno relativas aos modelos envolvidos nessa comparação estão listados na abaixo (Vide Tabela 10). Em algumas partes a rede teve de ser diminuída para permitir a simulação de todo o processo.

Tabela 10 Condições de contorno das simulações para verificação da influência da duração das etapas intermediária na temperatura final do tarugo

Nome do modelo	Tamanho dos elementos (mm)	ϵ Ferramenta	Origem do tarugo	Duração (s)
Modelo A 2,5 (F2A07123)	1,45772	0	-	2,5
Modelo B 2,5 (F2B07121_4_1)	1,45772	0	F2A07123	2,5
Modelo C 1,5 (F2C21121)	1,45764	0,85 (aço)	F2B07121_4_1	1,5
Modelo C 2,5 (F2C2112_2232)	1,45764	0,85 (aço)	F2B07121_4_1	2,5
Modelo D 0,439 (F2D19011)	0,2-1,45662	0,85 (aço)	F2C21121	0,439
Modelo D 0,439 (F2D09013_2232)	0,2-1,45662	0,85 (aço)	F2C21121_2232	0,439

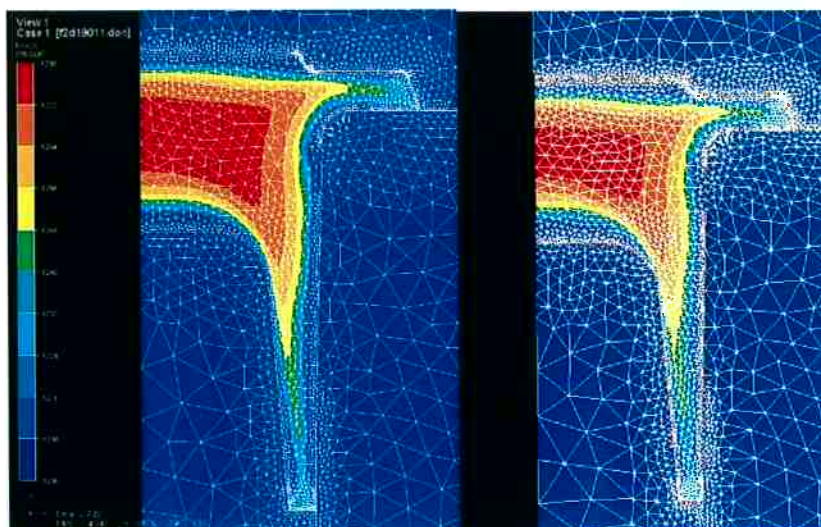


Figura 35 Diferença de gradientes de temperatura ao final da conformação a partir de partes com duração de modelo C igual à 1,5 s (à esquerda) e 2,5 s à direita

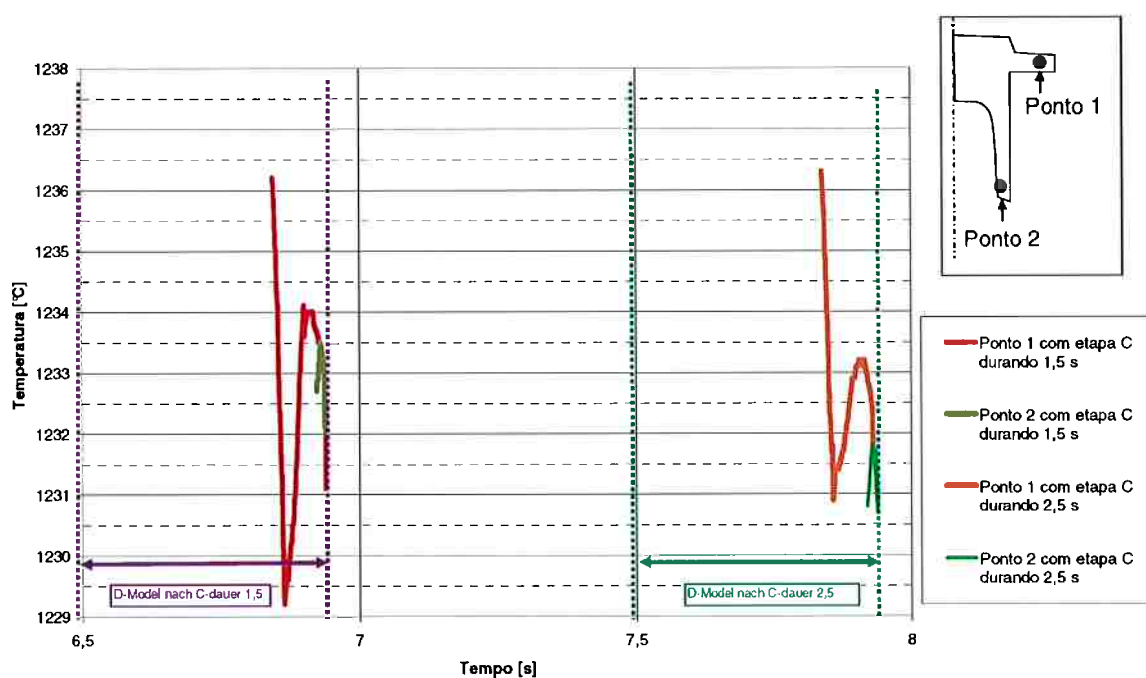


Gráfico 8 Influência da duração da etapa C na evolução da temperatura nas duas regiões críticas

Os sensores 1 e 2 indicam que, quando o material primeiramente passa por esses pontos, após cerca de 0,25 s do início da etapa D, a temperatura já está menor que 1240 °C (Vide Gráfico 8). Observa-se também que a redução na duração da etapa C

levaria a um aumento de cerca de 1 °C no ponto 1 apenas, e uma diferença insignificante para o ponto 2.

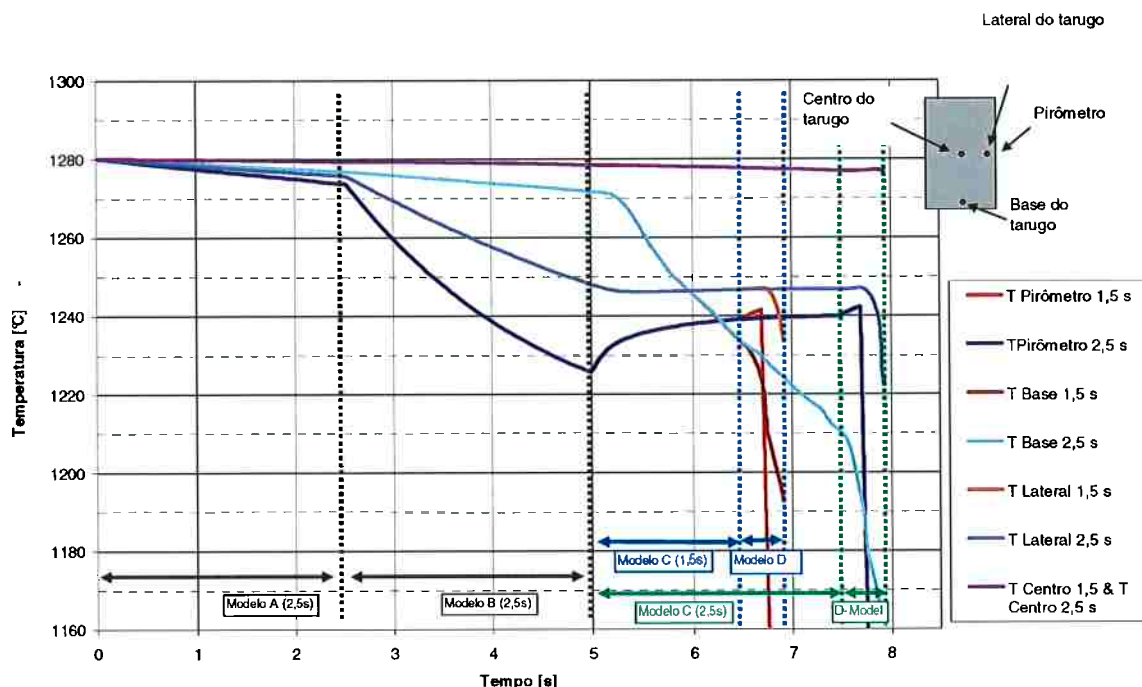


Gráfico 9 Efeito da duração da etapa C na temperatura nos sensores Lagrangianos

O efeito da redução da etapa C em 1 s, entretanto, é de 30 °C na base do tarugo (Vide Gráfico 9). Talvez devido ao maior tempo de contato dessa parte do tarugo com as ferramentas. Pode-se observar também que a temperatura do sensor já está abaixo de 1240 °C antes do início da conformação, e que esta é reduzida drasticamente na etapa D.

5.2 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO PUNÇÃO

A variante principal (a que representa o processo como é hoje) foi seguida então (etapa C com duração de 2,5 s), e a velocidade do punção foi variada entre 50, 75 e 100 m/s. Os resultados são apresentados no Gráfico 10.

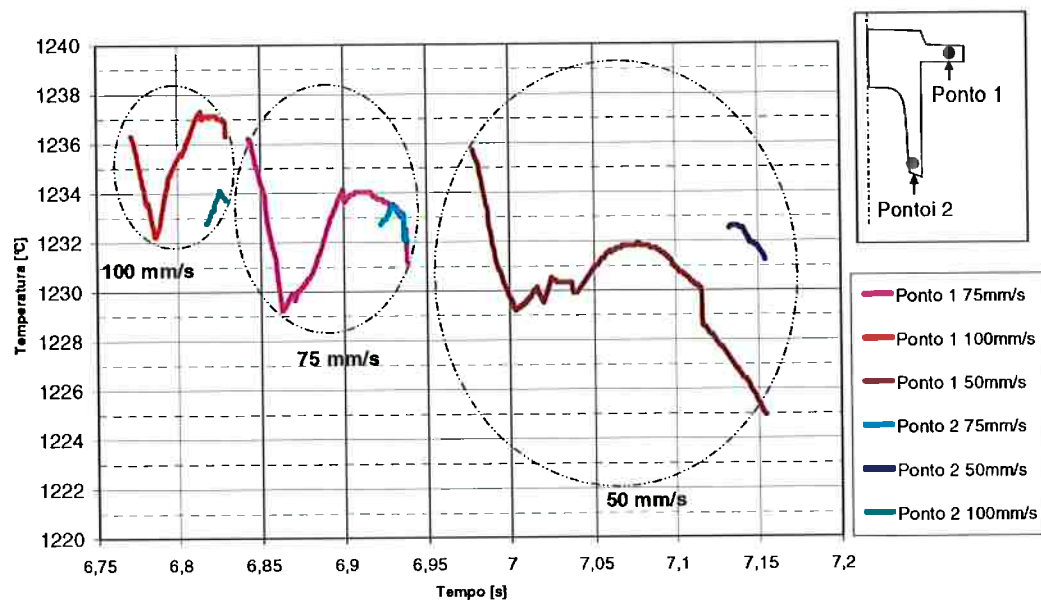


Gráfico 10 Influência da velocidade do punção na evolução da temperatura ao longo do forjamento nas áreas críticas

Observa-se que a temperatura no ponto 2 não varia significativamente com a velocidade do punção, mas que uma redução de 6 °C seria observada no ponto 1 ao final da conformação se a velocidade fosse 25 mm/s maior. Vale lembrar que a temperatura do material que passa nesses pontos continua abaixo de 1240 °C desde o começo da obtenção dos dados. Observa-se que a temperatura no ponto 1 seria fortemente reduzida (6 °C), caso a velocidade do punção fosse reduzida a 50 mm/s.

5.3 INFLUÊNCIA DO MATERIAL DA FERRAMENTA

Três combinações de materiais e ferramentas para a conformação foram testadas, e assim, a aplicabilidade do TZM foi investigada. Estas foram:

- Punção e matrizes de aço 1.2343
- Punção de TZM e matrizes de 1.2343
- Punção e matrizes de TZM

Os parâmetros aplicados foram os mesmos do “melhor caso”, e a velocidade do punção era de 75 mm/s. Uma parte das condições de contorno são apresentadas no item 3.1. Vale lembrar que o coeficiente de transferência de calor é o mesmo para os dois metais, sendo assim as únicas constantes diferentes são aquelas relativas ao próprio metal, como densidade, difusividade térmica e o calor específico. O gradiente de temperatura do punção foi importado para cada tipo de modelo após as simulações da etapa C.

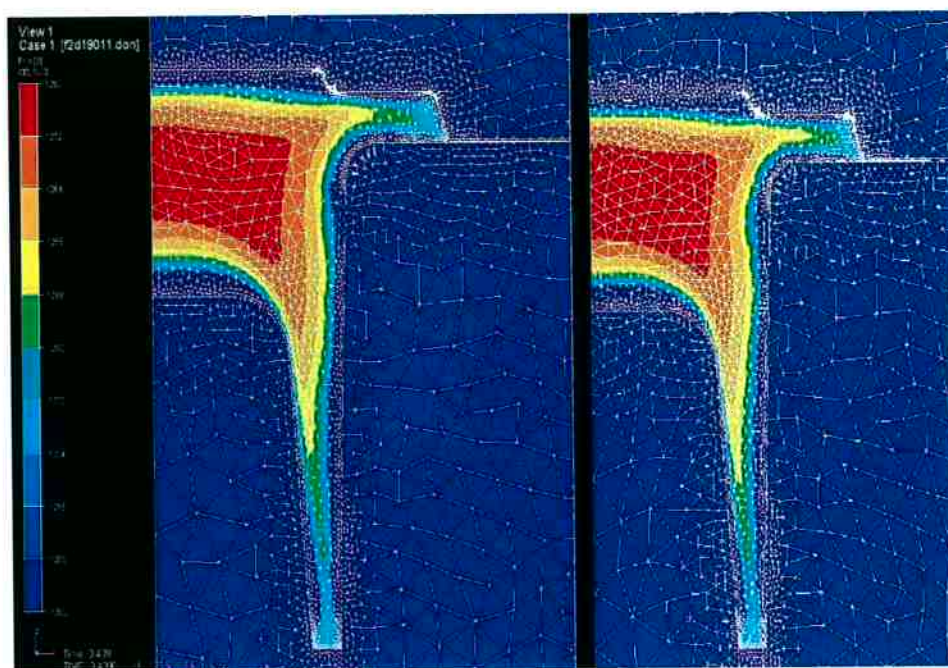


Figura 36 Gradiente de temperatura do tarugo para punção e matrizes de aço (à esquerda) e punção e matrizes de TZM (à direita)

Não é possível observar uma mudança significativa no gradiente de temperatura entre os casos (Vide Figura 36). Observa-se diferença de apenas 1 °C ao longo da curva do ponto 1, e de quase 3°C dos casos com TZM para os casos com aço (Vide Gráfico 11). Apesar de a diferença ser pequena, os resultados indicam que a opção com TZM permitiria um aumento de cerca de 3 °C no ponto 1. Também nos três casos, a temperatura nos pontos está desde o início abaixo da janela estabelecida.

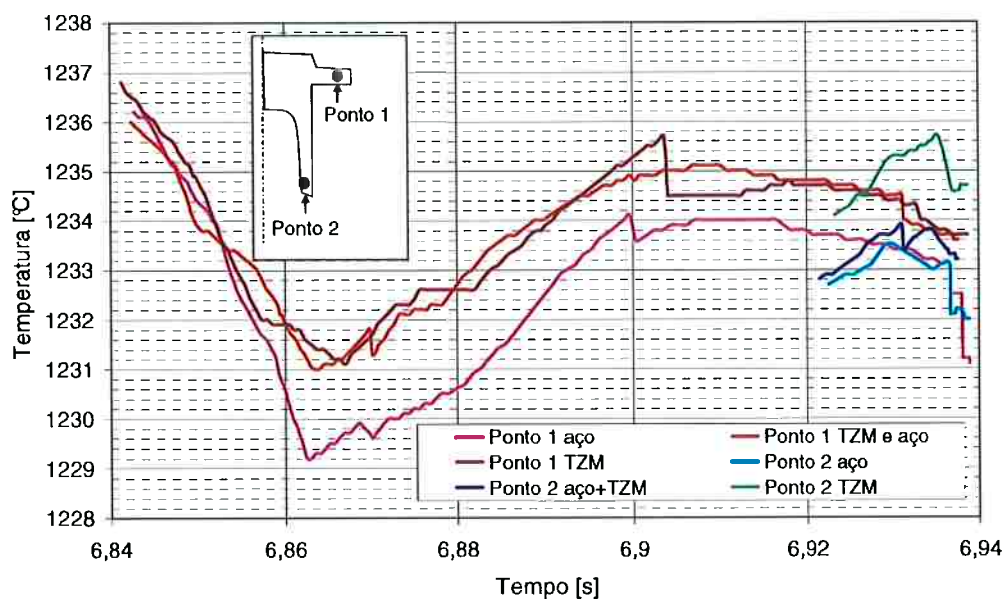


Gráfico 11 Evolução da temperatura nas áreas críticas para diferentes velocidades do punção

A distribuição de temperaturas nas ferramentas é razoável: as ferramentas de TzM, material que apresenta maior difusividade, apresentam maior área a mais de 300 °C que as peças de aço 1.2343. Assim, as ferramentas de aço apresentam maiores temperaturas nas superfícies de contato, o que é coerente com os resultados das simulações da etapa C (vide item 4.3). Dessa forma, a difusividade do TzM pode ser uma vantagem para a ferramenta, e não trazer prejuízos à peça conformada.

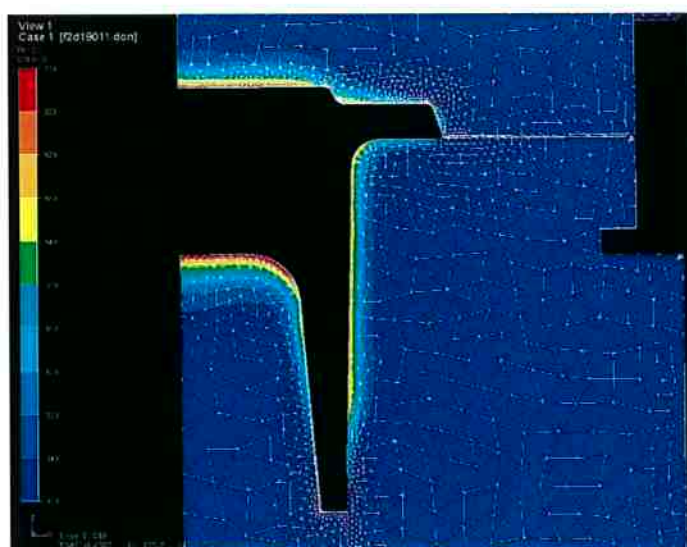


Figura 37 Gradiente de temperatura nas ferramentas de aço após a conformação

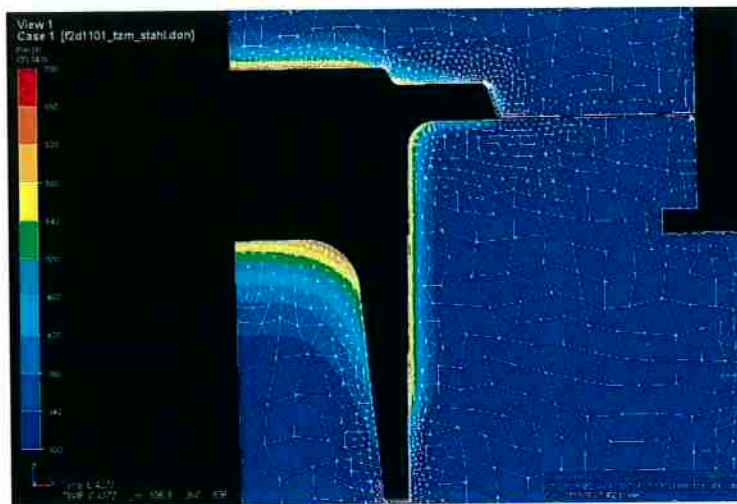


Figura 38 Gradiente de temperatura nas matrizes de aço e no punção de TZM

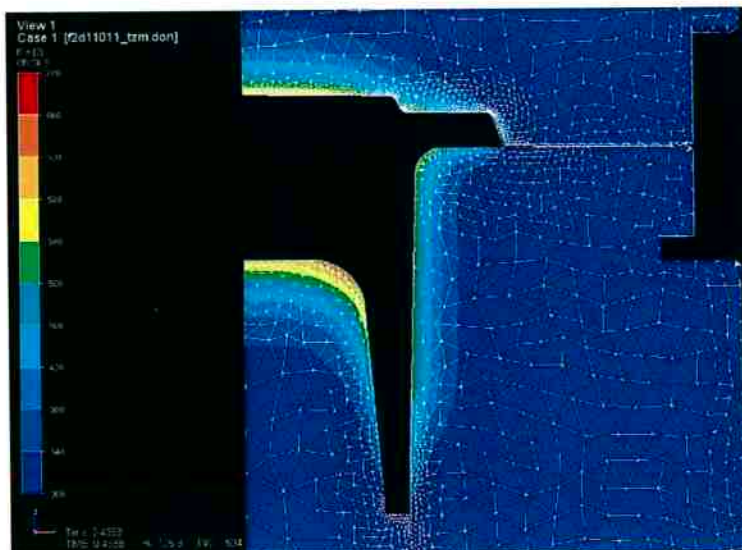


Figura 39 Gradiente de temperatura nas matrizes e punção de TZM

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Retomando a janela de processo estabelecida no capítulo 3, podemos dividir os resultados em temperaturas acima e abaixo desse limite inferior para facilitar a visualização (Vide Figura 40).

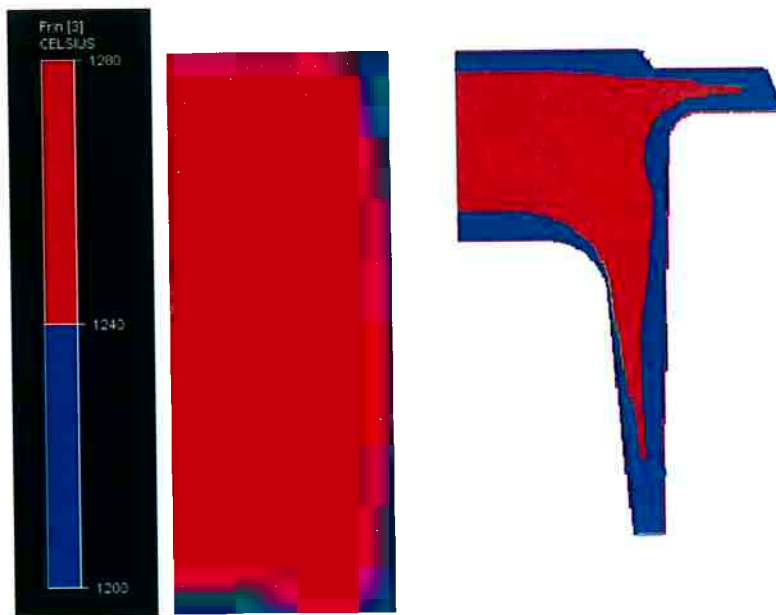


Figura 40 Representação esquemática do resfriamento do tarugo ao longo do processo, antes da conformação: vermelho é a área dentro da janela de temperatura adequada, azul é abaixo dela

Nas extremidades da peça observa-se que o material já começa a ser conformado fora dessa janela. Esse resultado pode explicar parte das falhas encontradas no processo (Vide Fig. 41).

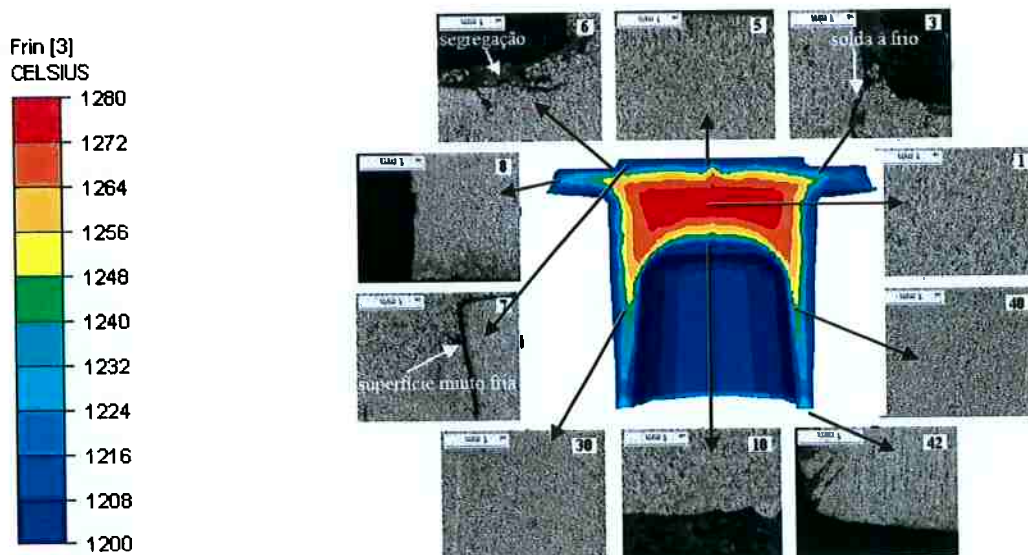


Figura 41 Representação da origem de falhas com respeito ao gradiente de temperatura

Nos cantos superiores encontra-se segregação de fase e solda à frio, o que é coerente com a baixa temperatura encontrada nessa região logo após o fechamento das matrizes (etapa C). No centro, encontra-se estrutura globulítica, o que também é coerente com a temperatura encontrada (próxima de 1280 °C).

Uma análise mais detalhada poderia ser feita utilizando coeficiente de transferência de calor variável ao longo da conformação (SEIDEL, 2006), ou alguma lei de escoamento mais próxima do comportamento tixotrópico ao invés da de viscoplasticidade, mas para a representação da temperatura, os valores obtidos são razoáveis.

As variantes de processo mais promissoras em termos da temperatura do tarugo foram as reduções na duração da etapa C e o aumento da velocidade do punção, sendo o primeiro mais significativo. Em todas as simulações foi observado que o material não atinge as extremidades na temperatura adequada: nos pontos 1 e 2 são observadas apenas temperaturas abaixo de 1240 °C.

Não foi observada grande diminuição da temperatura da peça com o uso desse material, mas sim um pequeno aumento (cerca de 1,5 °C na variante com todas as ferramentas de TZM) nas áreas críticas (Pontos 1 e 2). Esse aumento é muito pequeno para ser considerado entre as propostas de melhoria com relação à peça conformada. A mudança de material das matrizes e punção mostra-se apenas vantajosa para as próprias ferramentas: as ferramentas de TZM apresentam temperaturas bem menores e um gradiente de temperatura mais “suave” que as ferramentas de aço. Devido à diminuição da dureza do último com a temperatura, estas podem estar expostas a maior desgaste que as de TZM (PLANSEE, 2000).

6 MEF-CONFORMAÇÃO ATRAVÉS DE TIXOJUNÇÃO

No processo de tixojunção algumas partes metálicas (no estado sólido) são unidas ao aço X210CrW12 no estado semi-sólido. Através de simulações procura-se observar se essas partes já estariam sendo fundidas devido à troca de calor com o material semi-sólido. Essas partes começam com a mesma temperatura das matrizes (300 °C). Assim como para a simulação de tixoconformação, procura-se entender a evolução da temperatura do tarugo e as possíveis fontes de defeitos.

O modelamento da tixojunção distingue-se do modelamento para tixoforjamento devido, entre outras coisas, à diferente geometria do punção, e às partes a serem unidas. Também aqui foi considerado atrito deslizante entre as peças a serem conformadas. Outros parâmetros assumidos podem ser encontrados no item 3. Assim como para o forjamento, a conformação foi simulada apenas até o fim do movimento do punção, pois se acredita que boa parte dos defeitos surgem até esse instante.

A partir dos resultados da simulação, podemos apresentar a seguinte descrição do processo:

1. Inicialmente, apenas o pino está em contato com o material semi-sólido. Como uma área relativamente pequena (em relação ao caso do forjamento) está em contato, o material semi-sólido perde pouco calor, e o forjamento começa com o material a mais de 1240 °C (limite inferior da janela de processo em termos de temperatura assumido no cap. 3, abaixo do qual se considera material no estado sólido);
2. O material tixotrópico entra em contato com a matriz superior, e envolve o pino. A 0,2013 s do início do processo, ele entra em contato com o anel. Como o tarugo fica mais tempo em contato com o pino e com a matriz superior que com as outras partes, a temperatura na superfície de contato já é de 1200 °C. Nesse instante, a temperatura do tarugo está entre 1232 e 1240 °C;

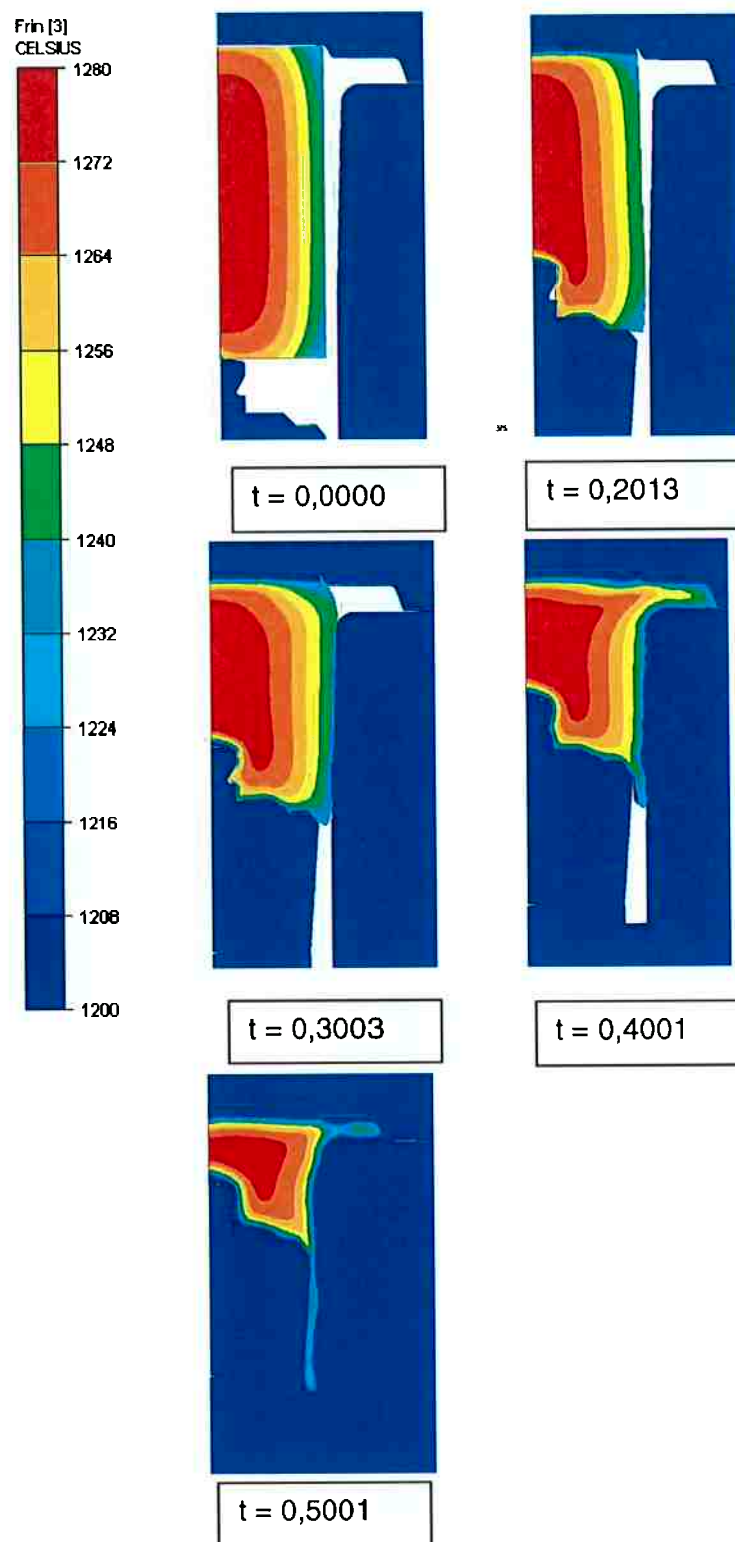


Figura 42 Representação da tixojunção após simulação com o software Forge 2

3. Após 0,3003 s o pino já está completamente envolvido pelo material tixotrópico, com uma parte a 1200 °C e outra parte a mais de 1240 °C. O

material avança para preencher a cavidade entre o anel e a matriz inferior com uma temperatura abaixo de 1240 °C;

4. Em toda a superfície de contato com o anel o material está abaixo de 1240 °C. Após 0,5001 s, a superfície de contato do material tixotrópico com as ferramentas e partes a serem unidas estão abaixo de 1200 °C. Entre as matrizes superior e inferior na extremidade direita, há uma região mais quente e isolada do centro do tarugo entre 1248-1200 °C. Após meio segundo do início da conformação, a superfície de contato do tarugo com as partes já está a menos de 1200 °C;

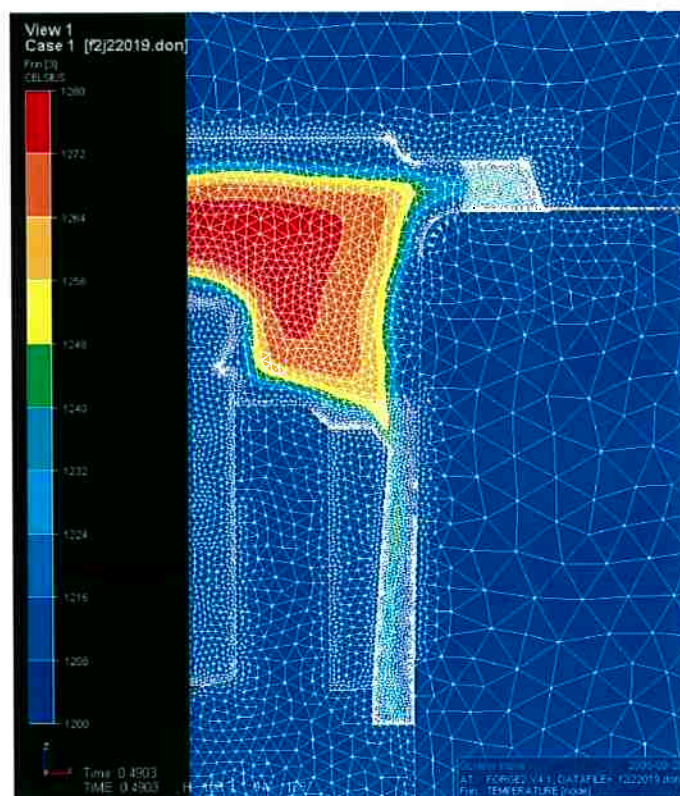


Figura 43 Formação de áreas isoladas a temperaturas mais altas nos pontos 1 e 2 a 0,49 s do início da conformação

O gradiente de temperatura obtido ao final da simulação da tixojunção é comparável ao obtido na tixoconformação (vide Figura 37) para matrizes de aço. A peça que mais tempo passa em contato com o tarugo é o pino (de CuSn12-C), e por isso sua temperatura é a mais alta, chegando a ficar entre 700 e 750 °C. O anel de cobre fica

entre 300 e 450 °C (vide Figura 44). Ambas as partes ainda estão abaixo da temperatura de fusão (por volta de 1000 °C para ambas as ligas).

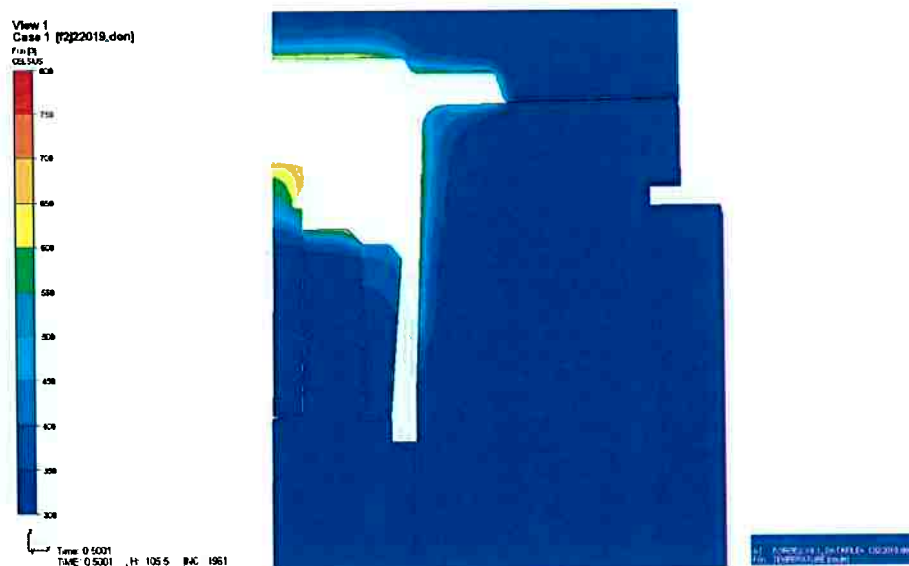


Figura 44 Gradiente de temperatura nas ferramentas e nas peças a serem unidas por tixojunção

6.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A janela de temperatura da tixojunção é menor que a de tixoforjamento. De um lado a temperatura deve ser tão alta como a para o tixoforjamento. Por outro lado, o contato com as peças a serem unidas pode chegar a fundir as mesmas, dependendo do tempo e da área de contato.

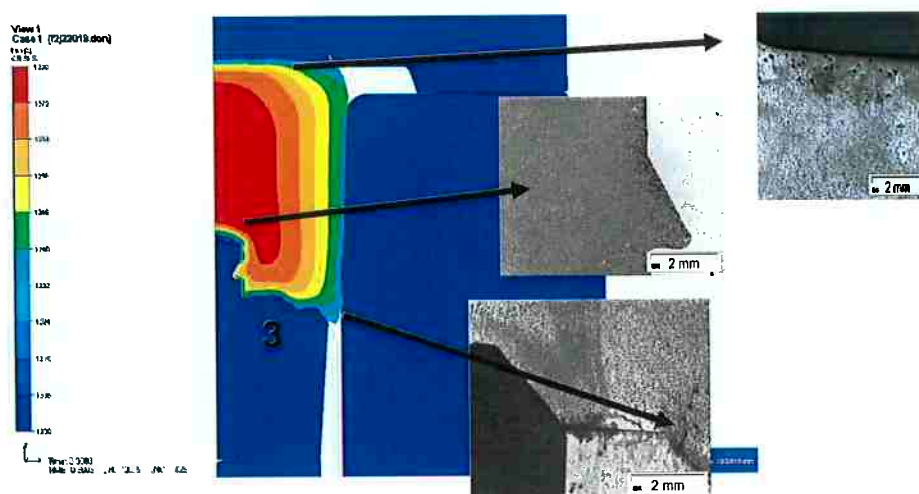


Figura 45 Distribuição da temperatura no material tixotrópico durante a tixojunção e falhas típicas

As metalografias acima podem ser assim entendidas também com base nas simulações:

- 1) Os poros remanescentes ao final da conformação são aqueles gerados numa área com grande fração sólida, ou seja, a uma temperatura tão baixa, que a etapa seguinte de “condensação” logo após a conformação não consegue colapsar os poros gerados no resfriamento;
- 2) O relevo do pino foi completamente preenchido, indicando que de fato o material tixotrópico estava a uma faixa de temperatura ótima;
- 3) A tensão surgida por compressão do material ao longo do resfriamento pode levar ao trincamento da peça. Na região inferior da peça entre esta e a matriz inferior surge uma área a maior temperatura isolada no centro da peça, que pode explicar as porosidades encontradas anteriormente nessa região (BAADJOU, 2006).

Os resultados aqui representados não indicam fusão de nenhuma das partes a serem unidas. Em trabalhos futuros pode ser estudado se as propriedades mecânicas dessas partes poderiam ser afetadas, e a quais materiais o processo seria aplicável.

7 CONCLUSÕES

Tixoconformação é um processo competitivo para a fabricação de peças metálicas de geometria complexa e com alta resistência mecânica, no qual o material é conformado no estado semi-sólido. O método dos elementos finitos é uma poderosa ferramenta na compreensão e melhoria de processos, por permitir a medição de variáveis complicadas ou impossíveis de se obter em modelos físicos. Com o objetivo de compreender e orientar melhorias de processo, dois tipos de tixoconformação (tixoforjamento e tixojunção) estudados no IBF foram simulados neste trabalho. A conformação de uma peça axialmente simétrica de aço X210CrW12 (correspondente ao D4 e D6 da norma AISI) foi modelada e simulada no software Forge 2. Algumas grandezas de processo do tixoforjamento foram variadas a fim de entender suas influências e algumas mudanças foram testadas através de simulações. O foco era a perda de calor no tarugo e o fluxo deste nas ferramentas, a partir do qual se têm uma indicação de quais mudanças afetam mais um processo.

Grandezas como velocidade e temperatura do punção e duração de etapa intermediária foram variadas. Algumas possíveis melhorias foram testadas, em termos de diminuição da oxidação e aplicação da liga de molibdênio TZM para as ferramentas. As propriedades físicas dos materiais tanto do X210CrW12 como das ferramentas e do contato entre elas foram obtidas em trabalhos anteriores e aplicadas. Através da experiência e desses estudos, foi estabelecido uma janela ótima de temperatura a 1240 °C para o material tixo trópico, abaixo da qual ele está praticamente sólido. As ferramentas envolvidas na conformação foram modeladas, a fim de observar o quanto elas são exigidas e a difusão de calor dentro delas.

Os processos de tixoforjamento e tixojunção foram então modelados em 4 tipos de modelos conforme as etapas de processo, com nomes de A a D. A simulação do modelo que representa a abertura do forno (modelo A) mostrou que a temperatura cai lentamente em relação às etapas subseqüentes, devido à alta temperatura do suporte do tarugo na superfície de contato (1120 °C) e da cerâmica de que este é composto. Nesta etapa (e apenas nesta) a radiação é o fenômeno de perda de calor mais importante. Nas etapas B e C (transporte do tarugo e fechamento das matrizes)

o fenômeno mais importante é a convecção e a transferência de calor com as ferramentas.

Em geral, a temperatura do tarugo cai rapidamente, principalmente na etapa de conformação. Assim, a duração das etapas tem uma influência grande no gradiente térmico do tarugo antes e depois da conformação. Uma redução em 1 s da duração de cada etapa de A a C seria capaz de manter as temperaturas nos sensores acima do limite de 1240 °C e gerar menores áreas com temperaturas fora da janela ideal. Se o processo atual tivesse apenas a etapa C prolongada em 1 s, a temperatura do tarugo seria reduzida a tal ponto, que os efeitos seriam perceptíveis na base deste, mas imperceptíveis nos dois pontos das extremidades da peça ao final da conformação (etapa D).

A mudança na velocidade do punção mostrou influência principalmente no ponto 1, mas quase nenhuma influência no ponto 2 (pontos das extremidades escolhidos para análise, vide item 5). Uma temperatura 5 °C maior nesses pontos é encontrada no caso com velocidade de punção igual a 100 mm/s (25 mm/s maior que a velocidade atual). Em comparação, se o processo tivesse uma velocidade de punção igual a 50 mm/s, a temperatura do ponto 1 seria cerca de 6 °C menor.

O aumento da temperatura do punção de 300 a 400 °C não trouxe uma diferença significativa na temperatura da base do tarugo durante a conformação (diferença de dois graus após o modelo C, e menor de um grau após modelo D), mas sim no próprio punção, que chegou a atingir 650 °C. Como a dureza diminui com a temperatura (PLANSEE, 2000), esta alternativa pode ser muito danosa para o punção de 1.2343 e sem sentido para melhoria da qualidade das peças.

O material do punção e das matrizes também não mostrou influência significativa no tarugo tanto nas etapas de transporte como nas de forjamento (a variante com todas as ferramentas de TZM apresentou temperatura de 3 a 1,5 °C maior que a do tarugo no caso com ferramentas de aço nos pontos críticos selecionados). Assim, fica claro que não se pode tentar resolver o problema da queda brusca de temperatura do tarugo na conformação lançando mão apenas de metais. O coeficiente de transferência de calor para metais durante a conformação é de 15000 W/(m²K),

segundo trabalhos anteriores (SEIDEL, 2006), o que, de acordo com os resultados, parece ter maior peso que a difusão térmica (o TZM tem difusividade maior que a do aço).

Observa-se que o punção e as matrizes de TZM apresentam temperaturas significativamente menores (o punção de aço chega a mais de 700 °C, enquanto o de TZM chega a 620 °C), e gradiente térmico mais homogêneo que o de aço, o que pode aumentar a vida do punção.

Assim, as mudanças de processo significativas sobre o tarugo são as seguintes: eliminação da oxidação (aumento de 4 °C na base do tarugo e 8 °C na lateral) e nas etapas de transporte e fechamento de matrizes, redução de 1 s por etapa anterior à conformação (todos os sensores estariam acima da limite inferior estabelecido de 1240 °C, e a área de material fora da janela ótima se reduziria). A mudança do material da ferramenta para TZM seria positiva para a própria ferramenta, mas indiferente para a peça. Essa alternativa requer posterior pesquisa para confirmação se a vida do punção pode ser aumentada a ponto de compensar essa mudança.

O processo de tixojunção foi também ilustrado para fins de compreensão do gradiente de temperatura ao longo do processo. A etapa de fechamento das matrizes foi menos crítica para a tixojunção que para o tixoforjamento devido à pequena área de contato pino-tarugo, em relação a punção-tarugo no segundo caso. Observou-se que apenas o pino entra em contato com o material tixotrópico em sua temperatura ótima. O anel entra em contato com o material quando a temperatura parece muito baixa para proporcionar uma junção adequada, e a fração sólida é muito grande. Entre o anel e a matriz inferior observa-se uma área muito aquecida e isolada, que pode ser a origem das trincas encontradas na união dessa parte com o centro da peça. Foi observado também que tanto no caso da tixojunção como do tixoforjamento a temperatura da superfície do material tixotrópico está a cerca de 1200 °C, o que pode gerar defeitos superficiais e porosidades. Os materiais a serem unidos por tixojunção não chegam a fundir dentro do X210CrW12, e assim sua geometria permanece inalterada ao longo do processo. Cabem estudos posteriores em relação às mudanças nas propriedades físicas causadas pelo aquecimento vindo do contato com o material semi-sólido.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATKINSON, H. V. **Modelling the semisolid processing of metallic alloys**. Prog. Mater Sci, Vol. 50, p.341-412, 2005.

BAADJOU, R; SHIMAHARA, H; HIRT, G. **Automated Semi-Solid Forging of Steel Components by means of Thixojoining**. Semi-Solid State Phenomena, Vols. 116-117, p. 383-386, 2006.

CHIARMETTA, G.; **Thixoforming of automobile components**. Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, p. 336-341, The University of Sheffield, England, June 1996.

DANCETTE, S.; **Theoretical and Experimental Investigations for the Modelling of Steel Thixoforging**. Dissertação (Mestrado) Institut für Bildsame Formgebung, Aachen, 2005.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. **DIN 1342-1: Viskosität – Teil 1: Rheologische Begriffe**, November 2003.

HIRT, G. et. al. **Semi-Solid Forging of 100Cr6 and X210CrW12 Steel**, CIRP, Vol. 54/1 p.257-260, 2005.

INGERSOLL, http://www.ingersoll-imc.com/en/products/Ingersoll_CAT-009_HoleM_Tech.pdf site acessado dia 15.01.2008 às 11.20 horas

KOBAYASHI, S.; OH, S.; ALTAN; T. **Metalforging and the Finite-Element-Method**, Columbus, 1998.

BREMER, T; MERTENS, H-P.; HEUBEN, H-P. KOPP, R. **Thixoforging – Materials flow and mechanicals properties**. Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, p. 336-341, The University of Sheffield, England, June 1996.

KOPP, R.; WIEGELS, H. **Einführung in die Umformtechnik**. Verlag der Augustin Buchhandlung, Aachen, Deutschland, 1998.

R. KOPP; ABEL, D.; SCHÖNBOHM, A.; KÜTHE, F. **An automated Thixoforging Plant for Steel Parts**, Thixoforming of Steels, 2004.

DEUTSCHES KÜPFERINSTITUT, **Werkstoff-Datenblätter**. Disponível em:
<www.kupfer-institut.de/front_frame/pdf/CuSn12-C.pdf > Acesso em 28.02.2006.

MAGMASoft Datenbank, 2006.

MATWEB, Disponível em:
<<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatID=15020>> Acesso em
15.01.2008.

MEYER, S. **Untersuchungsmethodik zur Gefügecharakterisierung für das Thixoforming von Aluminium und Stahl**. Dissertação (Doutorado), Shaker Verlag, Aachen, 2000.

MEUSER, H. **Ermittlung e Bewertung da Werkstoffparameter für das Thixoforming da Aluminium e Stahllegierungen**. Dissertação (Doutorado), Shaker Verlag, Aachen, 2003.

(PLANSEE SE. **Molybidän-Werkstoffeigenschaften und Anwendungen**.
disponível em < http://www.plansee.com/lib/Molybdenum_530DE.pdf > , p.16, Acesso
em 23.01.2008 2000.

PAULY, H. ; ENGEL, F. **Das Pyrometer-Kompendium**, p.62, IMPAC Electronic GmbH, Frankfurt/Main 1999.

SEIDEL, K. **Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen X210CrW12 und ZrO₂-beschichteten Werkzeugen beim Thixoschmieden in Experiment und Simulation**, Trabalho acadêmico (Studienarbeit), Institut für Bildsame Formgebung der RWTH Aachen, 2006

SHIMAHARA, H.; BAADJOU, R.; HIRT, G. **Investigation of Flow Behaviour and Microstructure on X210CrW12 Steel in Semi-Solid State**. Solid State Phenomena – Semi Solid Processing of Alloys and Composites, Vol.116-117, Page 189-192, 2006.

TRANSVALOR. **FPDBase**, Banco de Dados do FORGE 2007, TRANSVALOR S.A., 2000.

TRANSVALOR. **General Data File**, Forge ® v2005 3D Forging Datafile, Transvalor S.A. 2003.

VOIGT, R. **Erarbeitung einer Strategie zur Induktiven Erwärmung da Stahlwerkstoffen in den teilerstarrten Zustand für das Thixostrangpressen.**

Trabalho acadêmico (Studienarbeit), Institut für Bildsame Formgebung, 2006.

VESUVIUS GMBH, **Informação por fax**, 1999.

(ZAVALINGOS, A; LAWLEY, A. **Numerical Simulation of Thixoforming**, J. Mater. Eng. Perform.4 p.40-47, 1995.

ANEXO A

As propriedades físicas dos materiais aplicados estão listadas abaixo.

Materiais para ferramenta

Cerâmica isolante (VESUVIO, 1999 e HOLGER, 1999)

T(°C)	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]
260	0,42
540	0,59
815	0,75
1090	1,02

Tabela A-1 Cerâmica isolante de silicato de cálcio: dependência da condutibilidade térmica

Densidade [kg.m-3]	Calor específico [J.Kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Coeficiente de Dilatação térmica[K ⁻¹]	Emissividade
1200	1130	6.10-7	0,8

Tabela A-2: Cerâmica Isolante: grandezas térmicas

TZM

Propriedades físicas do TZM (SEIDEL, 2006 e PLANSEE, 2005):

T(°C)	Calor específico [J/(Kg.K)]
20	250
1000	310
2000	440

Tabela A-3: Dependência do calor específico do TZM com a Temperatura

T(°C)	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]
20	126
1000	98
1500	86

Tabela A-4: Dependência der Condutibilidade térmica do TZM com a Temperatura

T(°C)	Emissividade
1000	0,35
1500	0,39
2000	0,44

Tabela A-5: Dependência da Emissividade com a Temperatura do TZM

Coeficiente de Poisson	Módulo de Young (N/mm²)	T(°C)
0,3	2,67E+05	1000

Tabela A-6: Coeficiente de Poisson e módulo de Young do TZM

Aço 1.2343 ou X38CrMoV5-1

Propriedades físicas disponíveis no banco de dados do Forge3 (TRANSVALOR, 2000).

T(°C)	Densidade (Kg/m³)	Calor (J/Kg.K)	específico	Condutibilidade (W/m.K)	térmica
0	7799,18	375,453		34,8805	
100	7775,88	499,355		37,7373	
200	7747,07	551,154		38,9327	
300	7713,41	566,455		38,7016	
400	7675,58	580,863		37,2786	
500	7634,24	629,983		34,8987	
600	7590,06	749,421		31,7966	
700	7543,71	974,78		28,2071	
800	7495,87	793,133		24,3650	
900	7486,3	783,605		23,1290	
1000	7397,37	744,124		24,7070	
1100	7326,02	696,644		25,4612	
1200	7287,52	663,12		25,0551	
1300	7297,11	668,8		23,1520	

Tabela A-7: Densidade, calor específico e condutibilidade térmica com relação à Temperatura do 1.2343

Coeficiente Poisson	de Módulo (N/mm²)	de Young T (°C)
0,3	1,820E+05	0

Tabela A-8: Coeficiente de Poisson, módulo de Young do 1.2343

X210CrW12

Os dados para este material foram obtidos em trabalhos realizados anteriormente no IBF e na RWTH (DANCETTE 2005).

T [°C]	Parte H [J/kg]	Parte Cp [J/(kg.K)]	Cp [J/(kg.K)]
20	0,00	459	459
800	0,00	712	712
1000	0,00	780	780
1189,99	0,00	830	830
1190	1201,20	830	2031
1199,99	1201,20	832	2033
1200	1401,40	832	2233
1209,99	1401,40	835	2236
1210	1601,60	835	2437
1219,99	1601,60	837	2439
1220	11222,44	840	12062
1224,99	11222,44	833	12055
1225	1091,11	833	1924
1279,99	1091,11	807	1898
1280	2642,01	807	3449
1332,99	2642,01	769	3411
1330	0,00	769	769
1333	0,00	769	769
1360	0,00	779	779
1400	0,00	794	794

Tabela A-9: Calor específico em relação com a Temperatura para o X210CrW12

T(°C)	Densidade [Kg/m³]	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]
20	7760	21,2
50	7753	21,7
100	7739	22,6
150	7726	23,4
200	7712	24,2
250	7697	24,5
300	7682	24,8

T(°C)	Densidade [Kg/m³]	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]
350	7665	24,6
400	7650	24,3
450	7633	24,4
550	7617	24,6
500	7602	25,1
600	7587	25,9
650	7572	27,2
700	7556	28,9
730	7547	29,9
750	7540	30,9
760	7614	31,6
780	7602	32,1
800	7590	32,5
820	7578	33
840	7566	33,4
860	7554	33,9
900	7531	34,5
950	7503	35,8
1000	7471	37,2
1050	7433	38,2
1100	7392	39,1
1150	7349	39,8
1200	7304	40,3
1245	7259	41
1360	6975	37
1400	6949	37,6
1450	6917	38,3
1500	6885	39,1

Tabela A-10: Condutibilidade térmica e Densidade da X210CrW12

CuSn12-C (KÜPFERINSTITUT, 2006)

T(°C)	Calor específico (J/Kg.K)	Condutibilidade térmica (W/m.K)
20	376	55
100	385	62
200	395	70

Tabela A-11: Calor específico e condutibilidade térmica do CuSn12-C

T(°C)	Coefficiente de dilatação térmica (1/K)
100	1,78E-05
200	1,81E-05
300	1,85E-05
400	1,89E-05

Tabela A-12: Coeficiente de dilatação térmica do CuSn12-C

T(°C)	Módulo de Young [GPa]
20	97
100	95
200	92
300	89
400	85

Tabela A-13: Módulo de Young da CuSn12-C

T[°C]	Densidade [Kg/m ³]	Coefficiente de Poisson	Emissivida de
20	8720	0,3	0,00E+00

Tabela A-14: Densidade, coeficiente de Poisson e emissividade da CuSn12-C

CuCo1NiBe (MAGMASOFT, 2006)

T(°C)	Calor específico [J/(Kg.K)]	Módulo de Young [GPa]
1	382,478	118
1000	412,097	59
1005	527,489	0,5
1006	517,541	-
2000	631,558	0,5

Tabela A-15: Calor específico e Módulo de Young da CuCo1NiBe

T(°C)	Densidade (Kg/m3)
0	8960
100	8914
200	8869
300	8810
400	8755
500	8721
600	8629
700	8557
800	8479
900	8396
1000	8316
1005	8062
1100	7986
1200	7906
1300	7826
1400	7746
1500	7666
1600	7586
2000	7283

Tabela A-16: Densidade da CuCo1NiBe

T(°C)	Emissividade	Coeficiente de Poisson
20	7,00E-01	0,3

Tabela A-17: Emissividade e Coeficiente de Poisson da CuCo1NiBe

T(°C)	Coeficiente de dilatação térmica (1/K) E-05
400	1,2979
499,75	1,2979
500,25	3,5414
599,25	3,5414
600,25	2,7969
699,75	2,7969
700,25	3,057
799,75	3,057
800,25	3,2844
899,75	3,2844
900,25	3,1964
999,75	3,1964
1000,25	207,87
1004,75	207,87
1005,25	3,3286
1500	3,3286

Tabela A-18: Coeficiente de dilatação térmica da CuCo1NiBe

T(°C)	Condutibilidade térmica (W/m.K)
1	200
100	240
200	280
300	320
400	285
500	254
600	251
700	240
800	222
1000	163
1005	160
2000	160

Tabela A-19: Condutibilidade térmica da CuCo1NiBe