

ESCOLA POLITÉCNICA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEP. DE ENG. METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Trabalho de Formatura

Estudo do Modelo de Evolução Microestrutural de Forjados, Aplicado ao Software Form2D

EPMT

51888

Marcelo de Azevedo Camelo

Orientado pelo Prof. Dr. Ronald L. Plaut

1997

Agradecimentos

Maria Fernanda, pela paciência, compreensão e amor,
prof. Ronald Plaut, pela orientação,
Leslie Paas, pela ajuda,
meu pai e minha mãe, por tudo,
e a todos que, de alguma forma, me ajudaram nesses últimos 6 anos.

Índice Analítico

ÍNDICE ANALÍTICO	3
ÍNDICE DE TABELAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
1. INTRODUÇÃO.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. MODELAMENTO DA EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL.....	7
2.2. A GEOMETRIA DA MATRIZ DE FORJAMENTO E SUA INFLUÊNCIA NO CONTROLE MICROESTRUTURAL ...	8
2.3. A MELHORIA DE MICROESTRUTURA DE UMA BIELA POR SIMULAÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS	9
3. OBJETIVOS	10
4. PROCEDIMENTOS	11
4.1. SIMULAÇÃO	11
4.1.1. O Form2D	11
4.1.2. A Peça e as Ferramentas.....	11
4.1.3. Os Parâmetros de Forjamento	12
4.2. OS DADOS	13
4.2.1. O Formato de Saida dos Dados	13
4.2.2. A Coleta dos Dados	13
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DAS SIMULAÇÕES	14
5.1. VALIDAÇÃO DO MODELO DE EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL	14
5.3. O EFEITO DA VARIAÇÃO DA TAXA DE EXTRAÇÃO DE CALOR.....	26
5.3. O EFEITO DA VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO	30
5.5. O EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES EQUIPAMENTOS.....	34
5.5 O EFEITO DA GEOMETRIA DA MATRIZ SOBRE A DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA	38
6. CONCLUSÕES	43
7. BIBLIOGRAFIA.....	44

Índice de Tabelas

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DOS AÇOS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES DE PIETRZYK[1].....	14
TABELA 2 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO 5.1.1	15
TABELA 3 - DADOS DE TEMPERATURA, DEFORMAÇÃO, TAXA DE DEFORMAÇÃO E TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO CALCULADO POR SELLARS E ROBERTS, OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO 5.1.1.....	16
TABELA 4 - TABELA COMPARATIVA ENTRE VALORES DE TAMANHO DE GRÃO* OBTIDOS POR SIMULAÇÃO 5.1.1 NO FORM2D, VALORES OBTIDOS POR PIETRZYK UTILIZANDO O APLICATIVO FORGE2 E VALORES EXPERIMENTAIS[1].	19
TABELA 5 - DIFERENÇA PERCENTUAL ENTRE TAMANHOS DE GRÃOS CALCULADO PELOS MODELOS/APLICATIVOS ESTUDADOS E OS VALORES EXPERIMENTAIS OBTIDOS.	19
TABELA 6 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO 5.1.2	20
TABELA 7 - DADOS DE TEMPERATURA, DEFORMAÇÃO, TAXA DE DEFORMAÇÃO E TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO RECRISTALIZADO CALCULADO POR SELLARS E ROBERTS, OBTIDOS PELA SIMULAÇÃO 5.1.2.21	
TABELA 8 - TABELA COMPARATIVA ENTRE VALORES DE TAMANHO DE GRÃO* OBTIDOS POR SIMULAÇÃO 5.1.2 NO FORM2D E VALORES OBTIDOS POR PIETRZYK UTILIZANDO O APLICATIVO FORGE2[1].	22
TABELA 9 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO 5.2.1 E 5.2.2.	26
TABELA 10 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO RECRISTALIZADO*, UTILIZANDO DIFERENTES TAXAS DE EXTRAÇÃO DE CALOR, NAS SIMULAÇÕES 5.2.1.....	27
TABELA 11 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO RECRISTALIZADO*, UTILIZANDO DIFERENTES TAXAS DE EXTRAÇÃO DE CALOR, NAS SIMULAÇÕES 5.2.2.....	28
TABELA 12 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO 5.3.1 E 5.3.2.	30
TABELA 13 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO RECRISTALIZADO*, UTILIZANDO DIFERENTES COEFICIENTES DE ATRITO, NAS SIMULAÇÕES 5.3.1.	31
TABELA 14 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO RECRISTALIZADO*, UTILIZANDO DIFERENTES COEFICIENTES DE ATRITO, NA SIMULAÇÃO 5.3.1.	32
TABELA 15 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO 5.2.1 E 5.2.2.	34
TABELA 16 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO RECRISTALIZADO*, UTILIZANDO DIFERENTES EQUIPAMENTOS, NAS SIMULAÇÕES 5.4.1.	35
TABELA 17 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO RECRISTALIZADO*, UTILIZANDO DIFERENTES EQUIPAMENTOS, NAS SIMULAÇÕES 5.4.1.....	36
TABELA 18 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO 5.5.1 A 5.5.4.....	39
TABELA 19 - RESULTADOS OBTIDOS COM UTILIZAÇÃO E DIFERENTES MATRIZES DE PRÉ-FORMA (5.5.1 A 5.5.4), AO LADO DOS RESULTADOS OBTIDOS POR KUSIAK.	39
TABELA 20 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO 5.5.5 E 5.5.6.	40
TABELA 21 - RESULTADOS OBTIDOS COM A UTILIZAÇÃO E DIFERENTES MATRIZES DE PRÉ-FORMA SIMULAÇÕES 5.5.5 E 5.5.6.	41

Índice de Figuras

FIGURA 1 - GEOMETRIA E PARÂMETROS DE FORJAMENTO PARA SIMULAÇÃO 5.1.1.....	17
FIGURA 2 - PERFIS DE TEMPERATURA APÓS FORJAMENTO	17
FIGURA 3 - PERFIS DE DEFORMAÇÃO APÓS FORJAMENTO	18
FIGURA 4 - PERFIS DE TAXA DE DEFORMAÇÃO APÓS FORJAMENTO.	18
FIGURA 5 - GEOMETRIA E PARÂMETROS DE FORJAMENTO PARA SIMULAÇÃO 5.1.2.....	23
FIGURA 6 - PERFIS DE TEMPERATURA APÓS FORJAMENTO	23
FIGURA 7 - PERFIS DE DEFORMAÇÃO APÓS FORJAMENTO	24
FIGURA 8 - PERFIS DE TAXA DE DEFORMAÇÃO APÓS FORJAMENTO.	24
FIGURA 9 - MATRIZ DE PRÉ-FORMA COM PAREDE LINEAR 5.5.1.....	38
FIGURA 10 - MATRIZ DE PRÉ-FORMA COM PAREDE CONVEXA 5.5.2.....	38
FIGURA 11 - MATRIZ DE PRÉ-FORMA COM PAREDE CÔNCAVA 5.5.3.....	38
FIGURA 12 - MATRIZ DE PRÉ-FORMA COM PAREDE CÔNCAVA-CONVEXA 5.5.4.	38
FIGURA 13 - MATRIZ DE PRÉ-FORMA 5.5.5.	40
FIGURA 14 - MATRIZ DE PRÉ-FORMA 5.5.6.	40
FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DE GRÃO AUSTENÍTICO PARA AS MATRIZES 1 E 2 (5.5.5 E 5.5.6)..	42

1. Introdução

A indústria moderna tem que fornecer produtos que satisfaçam a demanda do mercado no tocante à qualidade do aço, precisão dimensional, distribuição do tamanho de grão e propriedades mecânicas. Assim sendo, os modelos matemáticos dos processos de conformação, além de descrever os eventos térmicos e mecânicos, deveriam prever a evolução da microestrutura[1].

Modelos termomecânicos de elementos finitos permitem a simulação da deformação do metal e da transferência de calor na zona de deformação com razoável precisão. O fato de que estes modelos fornecem informação detalhada sobre os campos de temperatura, deformações e taxas de deformação fizeram com que fossem publicadas várias propostas de abordagens à questão termomecânica-microestrutural[1].

Simulações numéricas de processos de conformação de metais tem se tornado cada vez mais significantes nos últimos anos. Este interesse crescente deve-se à duas causas principais. Primeiramente, após cautela inicial, a confiança em técnicas "modernas" cresceu substancialmente. Em segundo lugar, o grande avanço na tecnologia de computadores conseguiu finalmente fornecer o poder de processamento necessário para simular processos complexos de forjamento, dentro de um período de tempo aceitável[2].

Atualmente, um processo de simulação muito importante é o Método de Elementos Finitos (FEM). Atividades de pesquisa e desenvolvimento ao redor do mundo têm constantemente melhorado e otimizado aplicações FEM[2].

Evolução microestrutural após o processo de deformação é uma questão de grande interesse para a melhora da qualidade e propriedades do produto final. Os aplicativos comerciais existentes para a análise de processos de forjamento de metais são úteis apenas para a descrição da deformação plástica e da variação de temperaturas, mas eles geralmente não tem condições de analisar a microestrutura do material deformado[3].

O problema da correlação entre os parâmetros do processo e o desenvolvimento da microestrutura tem sido de interesse de muitos cientistas[3] e é o objeto do presente trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

Analiseamos alguns dos artigos utilizados como referências para este trabalho. Alguns dele sugerem modelos matemáticos, outros fornecem dados experimentais ou simulações de processos de forjamento a serem repetidos. Os artigos aqui analisados tratam de:

1. Modelamento da Evolução Microestrutural;
2. A Geometria da Matriz de Forjamento e sua Influência no Controle Microestrutural
3. A Melhoria de Microestrutura de uma Biela por Simulação de Elementos Finitos.

2.1. Modelamento da Evolução Microestrutural

No artigo "validation of the thermomechanical microstructural model for closed-die-forging"[1], os autores Maciej Pietrzyk e Zbigniew Kedzierski, et al., discutem a validade da aplicação das equações de Sellars-Whiteman e Roberts para o cálculo da evolução microestrutural de peças forjadas, a partir de dados fornecidos por simulações matemáticas de elementos finitos.

O modelo matemático é baseado em equações desenvolvidas por Sellars e Siweki, que descrevem a fração volumétrica da austenita recristalizada, o tempo necessário para 50% de recristalização e o crescimento de grão após a deformação. As equações utilizadas por Pietrzyk e Kedzierski são:

Sellars/Whiteman,

$$Dr = 25 \cdot \left(14.295 \cdot \ln \frac{10^{-9} Z}{8.5} \right)^{-2/3} \frac{1}{\varepsilon} D^{1/3}, \text{ com } Z = TD \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right); \text{ (equação 2.1.1) [1]}$$

Roberts et al.

$$Dr = 6.2 + 55.7 \cdot D^{0.5} \cdot \varepsilon^{-0.65} \cdot \exp\left(\frac{-3500}{RT}\right); \text{ (equação 2.1.2) [1]}$$

onde:

D - tamanho de grão austenítico antes da deformação;

Dr - tamanho de grão recristalizado;

R - constante dos gases;

T - temperatura;

Z - parâmetro de Zener Hollomon;

Q - energia de ativação (312 kJ/mol.K para aço carbono);

ϵ - deformação real;

TD - taxa de deformação real.

Pietrzyk e Kedzierski realizaram, sob condições controladas, o forjamento de uma peça originalmente cilíndrica à forma esférica. Esta peça teve, então, sua microestrutura analisada e fotografada e a distribuição do tamanho de grão foi medido.

Simulou-se então o mesmo processo, pela utilização de uma modelo matemático de elementos finitos (termomecânico), garantindo-se que os dados que alimentaram o modelo fossem o mais próximo possível da realidade. Sobre os resultados fornecidos pelo modelo (temperatura, deformação real e taxa de deformação), aplicou-se as equações de evolução microestrutural citadas anteriormente.

Os autores comparam então os valores obtidos na simulação com aquelas do processo real e concluem que o modelo é aplicável.

2.2. A Geometria da Matriz de Forjamento e sua Influência no Controle Microestrutural

No artigo "Die Shape and Evaluation of Microstructure Control in the Closed-die Axisymmetric Forging by Using Forge2 Program"[2] os autores J. Kusiak, Maciej Pietrzyk e J. Chenot discutem o controle da microestrutura final de um forjado pelo projeto apropriado da matriz de forjamento.

Para isto, eles implementas no código do aplicativo Forge2 as equações de previsão microestrutural de Roberts, descritas no item anterior e simulam uma série de forjamentos semelhantes, que acontecem em duas etapas.

Kusiak e Pietrzyk variaram a geometria da pré-forma a fim de estudar o efeito da geometria da matriz de pré-forma no tamanho de grão austenítico do forjado. O modelo

utilizado é o de Roberts (equação 2.1.2) e os autores concluem no artigo que a geometria da matriz de pré-forma tem influência na granulometria do forjado

2.3. A Melhoria de Microestrutura de uma Biela por Simulação de Elementos Finitos

Na artigo “Improvement of microstructure in forging of a connecting rod by means of finite element simulations”[3] os autores Kai Karhausen e Reiner Kopp discutem como melhorar a qualidade microestrutural de uma peça forjada utilizando simulações de elementos finitos.

A peça estudada é uma biela, forjada em duas etapas. O artigo simula o processo como é feito industrialmente e sugere modificações à matriz de pré-forma a fim de obter uma distribuição mais homogênea em toda a peça.

Os autores concluem que se pode obter uma maior homogeneidade granulométrica distribuindo melhor a deformação total entre as duas etapas de forjamento.

3. Objetivos

Os objetivos do presente trabalho são:

1. Verificar a aplicabilidade dos modelos de previsão microestrutural propostos por Sellars/Whiteman (equação 2.1) e Roberts (equações 2.2) ao utilizarmos o aplicativo de simulação de forjamento por Método de Elementos Finitos Form2D;
2. Avaliar a sensibilidade do modelo microestrutural quanto à variação da taxa de extração de calor (α);
3. Avaliar a sensibilidade do modelo microestrutural quanto à variação do coeficiente de atrito (μ);
4. Avaliar a sensibilidade do modelo microestrutural quanto à variação da velocidade da prensa;
5. Avaliar a influência da geometria da matriz de pré-forma na microestrutura da peça e verificar a aplicabilidade disto na tentativa de homogeneização granulométrica .

4. Procedimento

4.1. Simulação

4.1.1. O Form2D

As simulações foram feitas utilizando o aplicativo russo Form2D versão 1.12, de autoria de Nicolai Biba. Trata-se de uma ferramenta de simulação de processo de deformação de metais por Método de Elementos Finitos que, a partir de dados físicos, térmicos e geométricos, apresenta a evolução termo-mecânica de peças e matrizes durante processos de conformação mecânica. Este programa encontra-se disponível no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica para uso por alunos e professores.

O aplicativo está incompleto, entretanto, por não nos fornecer entre outras coisas, qualquer informação em relação à evolução microestrutural da peça.

4.1.2. A Peça e as Ferramentas

O Form2D trabalha com arquivos gráficos de formato F2D editáveis pelo aplicativo QDraft. Foi por meio deste programa que se fez o desenho das ferramentas e peças de trabalho utilizadas em todas as simulações.

Tanto a peça quanto as ferramentas devem seguir algumas restrições específicas para poderem ser utilizadas pelo Form2D. São elas:

- Deve haver apenas uma peça de trabalho;
- Devem haver duas ou três ferramentas (neste trabalho foram utilizadas sempre duas ferramentas);
- Tanto peça quanto ferramentas devem ser constituídas por polígonos fechados.
- A peça de trabalho deve ser armazenada na camada "Work Piece";
- As ferramentas devem estar armazenadas nas camadas "Tool 1", "Tool 2", etc.
- No caso de simulações axisimétricas, tanto peça quanto ferramentas devem tocar a linha imaginária de coordenadas $x=0$;

Além disto, percebeu-se durante os trabalhos a existência de uma regra operacional imposta pelo aplicativo Form2D quanto à geometria do conjunto peça/ferramentas. Trata-se da necessidade arredondar arestas vivas, a fim de evitar instabilidades no modelo matemático, uma vez que bordas em ângulo proporcionariam uma área de contato próximo a zero, levando ao cálculo de uma pressão infinita neste ponto.

4.1.3. Os Parâmetros de Forjamento

Após a importação do desenho para o Form2D, o próximo passo é a introdução no aplicativo das informações adicionais da simulação, estes dados são inseridos pela interface do programa, através de menus e consistem das seguintes variáveis operacionais:

- Tipo de equipamento;
- Lubrificante;
- Temperatura inicial das ferramentas;
- Coeficiente de transferência de calor;
- Material a ser forjado;
- Temperatura inicial da peça;
- Distância final entre as ferramentas;
- Numero de nós na malha para a simulação;

Após a entrada destas informações, pode-se dar início à simulação. Cada simulação pode levar de 2 a 4 horas para ser realizada, de acordo com a complexidade da peça, numero de nós da malha e computador disponível.

4.2. Os Dados

4.2.1. O Formato de Saída dos Dados

Após a realização da simulação, o aplicativo estará apto a exibir os resultados. Estes resultados poderão ser exibidos de duas formas básicas, através de gráficos de esforço ou através de diagramas de temperatura, deformação, velocidade, etc.

Para este trabalho, nos interessa a segunda forma de apresentação dos dados. Para podermos trabalhar com estes diagramas, é necessário a exportação dos mesmos para um aplicativo de tratamento de imagens. Após esta importação, as imagens podem ser impressas ou arquivadas em disco.

4.2.2. A Coleta dos Dados

A coleta dos dados é feita por observação das cores em cada região do gráfico obtido pela simulação.

Para tornar esta tomada de valores mais precisa, foi utilizada uma máscara em acetato, marcada com pontos arbitrários, a qual era sobreposta ao diagrama impresso. Assim foi possível garantir a exata equivalência entre os pontos utilizados.

A escolha dos pontos a serem utilizados foi feita levando em consideração a sua presença ou não no artigo cujos resultados estão sendo analisados/comparados, além da significância deste em relação ao forjado como um todo, ou seja, foram utilizados pontos distribuídos pela peça, com uma maior densidade de pontos nas regiões de grande variação de temperatura, deformação ou taxa de deformação.

5. Resultados e Discussão das Simulações

Dentre dos objetivos deste trabalho, passemos a detalhar a validação dos modelos, bem como a análise das influências dos parâmetros α , μ , velocidade e geometria da matriz no cálculo granulometria da peça simulada.

5.1. Validação do Modelo de Evolução Microestrutural.

Para validarmos a aplicabilidade das equações de previsão de evolução da microestrutura após o forjamento, com a utilização do software de simulação Form2D, foi proposta a repetição dos procedimentos feitos por Pietrzyk et al[1]. Neste artigo, os autores realizam, em condições industriais bem conhecidas, o forjamento de uma esfera, a partir de uma peça cilíndrica de dimensões 30mm (diâmetro) x 50mm (altura). Os materiais utilizados foram aços carbono, cujas composições se encontram na tabela 1. Estudou-se então a microestrutura resultante da operação.

Tabela 1 - Composição dos Aços Utilizados nas Simulações de Pietrzyk[1]

Aço	Carbono	Manganês	Silício	Molibidênio	Níquel
1	0,12	0,6	0,25	0,7	1,0
2	0,45	-	0,15	-	-

Os autores propõem, então, uma simulação do processo de conformação, utilizando o aplicativo Forge2, e a posterior aplicação dos modelos de Sellars/Whiteman e de Roberts (equações 3.1.1 e 3.1.2) para a avaliação da microestrutura resultante e posterior comparação com dados obtidos experimentalmente.

Esta mesma operação de forjamento a quente foi simulada durante a realização do presente trabalho. Foi utilizado como peça a ser forjada, um cilindro de dimensões 30mm (diâmetro) x 50mm (altura), similar ao utilizado por Pietrzyk. O material utilizado foi Aço Carbono 1020, por ser ele, dentre os disponíveis em nosso banco de dados, o de composição química mais próxima ao utilizado por Pietrzyk (Pietrzyk, em seu artigo afirma que os modelos de previsão microestrutural não são sensíveis à composição do aço utilizado[1]). Os diagramas de temperatura, deformação e taxa de deformação obtidos

podem ser observados nas figuras 1,2,3 e 4. Na tabela 2 podemos observar os parâmetros de simulação utilizados.

Tabela 2 - Parâmetros Utilizados na Simulação 5.1.1

Parâmetro de Simulação	Valor Utilizado
Equipamento	Prensa de Pesquisa (4.5 m/s)
Lubrificante	Poland ($\mu=0.1$)
Temperatura da Ferramenta (°C)	400°C
Material	Aço 1020
Temperatura da Peça (°C)	1100
Tempos de Resfriamento (s)*	2,3,3

*Os tempos de resfriamento referem-se ao tempo antes da peça entrar na prensa, tempo da peça na prensa (antes do forjamento) e tempo após forjamento (ainda na prensa).

Após a simulação obtivemos os valores de distribuição de temperatura, deformação e taxa de deformação mostrados na tabela 3. Nesta tabela temos também a distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado calculados utilizando as equações de Sellars/Whiteman e Roberts. Os pontos designados como 1,2,3 etc. e seus respectivos valores podem ser localizados sobrepondo a transparência 1 (anexa) às figuras 2,3 e 4.

A comparação entre os dados obtidos utilizando o programa Form2D e os resultados de Pietrzyk com o software Forge2 podem ser observados na tabela 4, em valores absolutos e na tabela 5, em diferenças percentuais dos resultados experimentais.

Tabela 3 - Dados de Temperatura, deformação, taxa de deformação e tamanho de grão austenítico calculado por Sellars e Roberts, obtidos pela simulação 5.1.1.

Ponto	<i>T.G inic*</i>	<i>Temp. (°C)</i>	<i>T. Deform.</i>	<i>Zener-Hollomon</i>	<i>Deform.</i>	<i>Sellars*</i>	<i>Roberts*</i>
1	67,20	1.070	0,80	1,1074E+12	0,20	45,45	62,67
2	67,20	1.026	0,80	2,8546E+12	0,37	22,61	40,24
3	67,20	1.100	0,80	6,0119E+11	0,58	16,63	36,474
4	67,20	1.080	0,80	9,0066E+11	0,58	15,98	35,13
5	67,20	1.070	5,30	7,3364E+12	0,75	10,37	30,12
6	67,20	1.100	0,80	6,0119E+11	0,58	16,63	36,47
7	67,20	1.080	0,80	9,0066E+11	0,58	15,98	35,13
8	67,20	1.070	5,30	7,3364E+12	0,75	10,37	30,12
9	67,20	1.070	0,80	1,1074E+12	0,30	30,30	49,59
10	67,20	1.026	0,80	2,8546E+12	0,40	20,92	38,56

*Tamanho de Grão Expresso em μm .

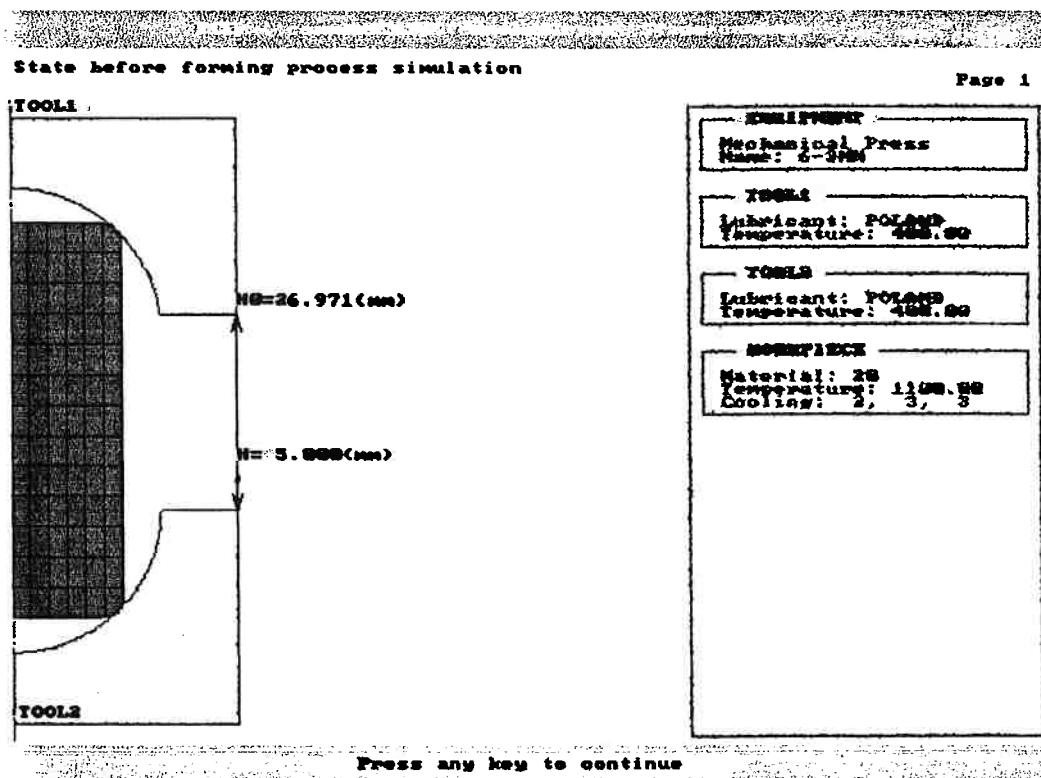


Figura 1 - Geometria e parâmetros de forjamento para simulação 5.1.1

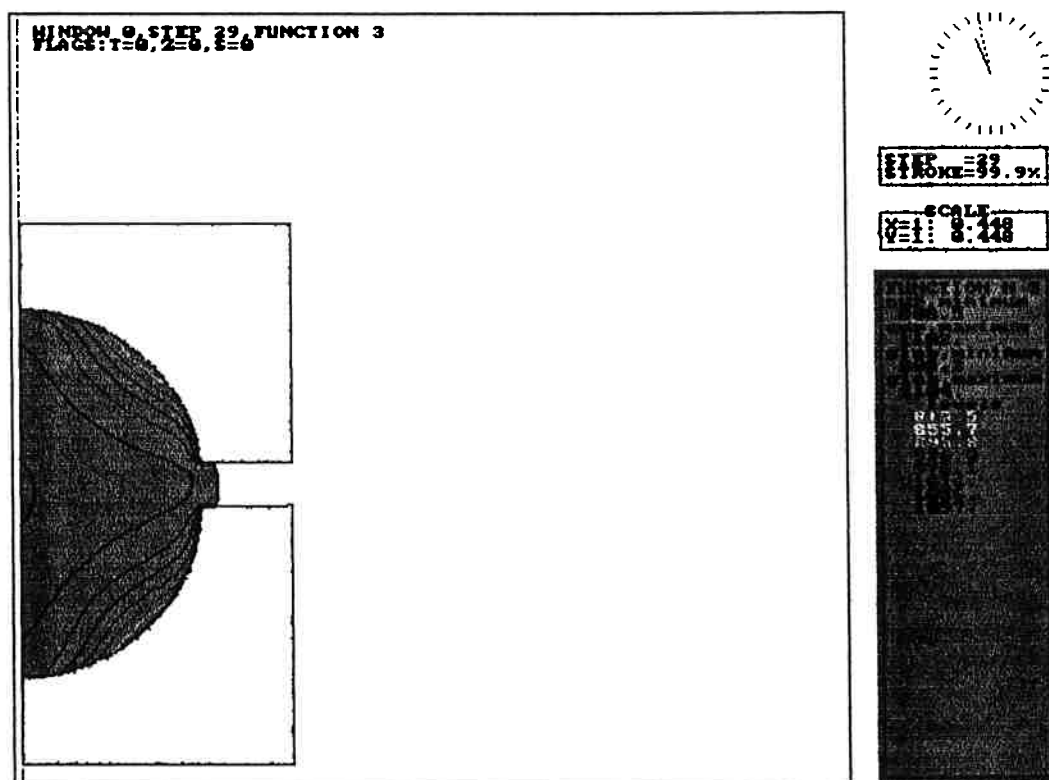


Figura 2 - Perfis de temperatura após forjamento

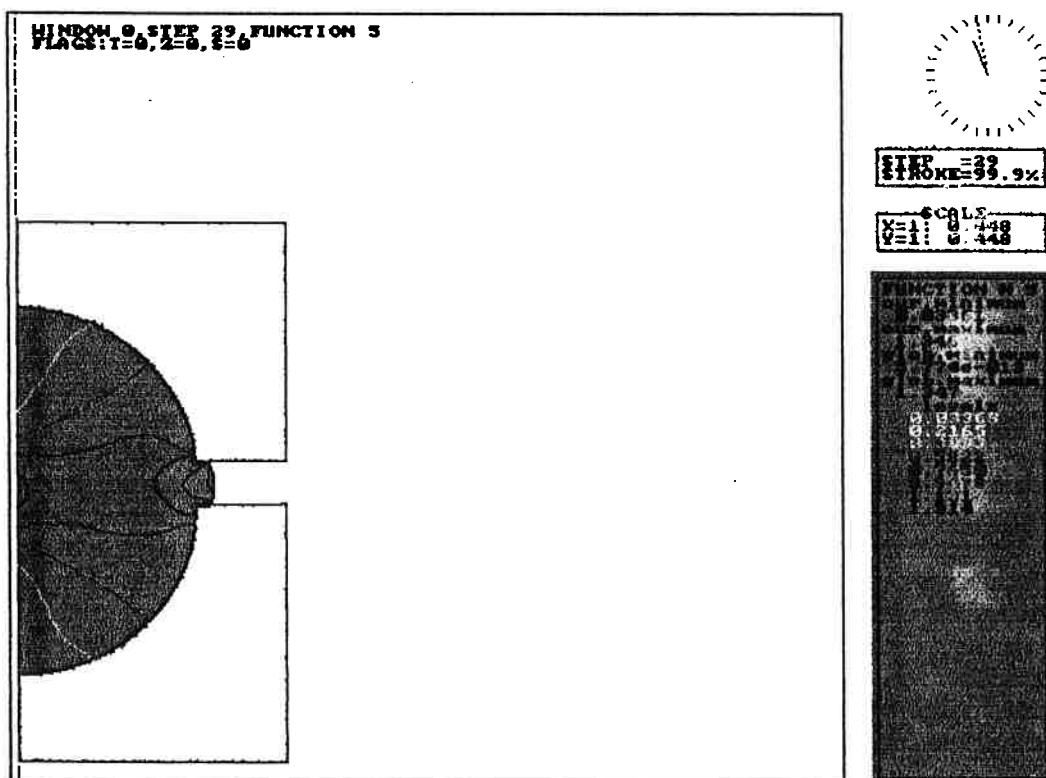


Figura 3 - Perfis de deformação após forjamento

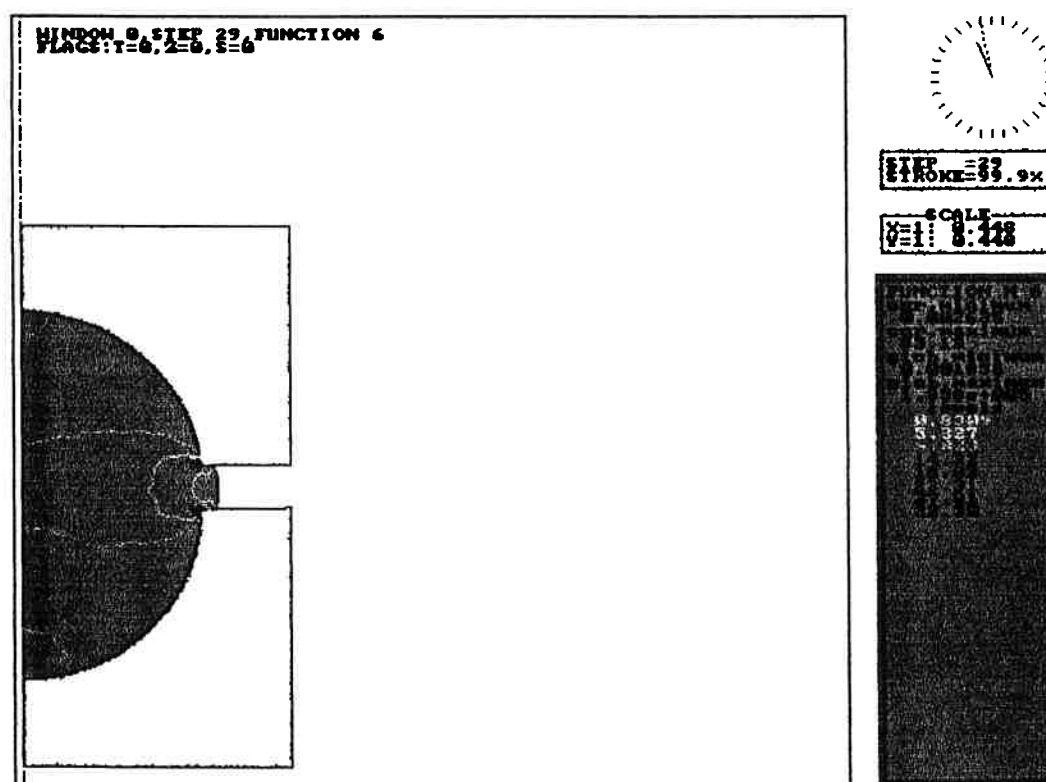


Figura 4 - Perfis de taxa de deformação após forjamento.

Tabela 4 - Tabela comparativa entre valores de tamanho de grão* obtidos por simulação 5.1.1 no Form2D, valores obtidos por Pietrzyk utilizando o aplicativo Forge2 e valores experimentais[1].

Presente Trabalho (Form2D)			Pietrzyk [1] (Forge2 e Experimental)		
Ponto	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	Experimental.
1	21,42	39,02	50,00	60,00	24,00
2	16,30	35,80	35,00	50,00	15,10
3	15,98	35,13	30,00	45,00	11,50
4	10,23	29,91	28,00	40,00	12,80
5	16,30	35,80	26,00	30,00	11,10
6	15,98	35,13	30,00	45,00	22,50
7	10,23	29,91	28,00	40,00	20,60
8	30,30	49,59	26,00	30,00	23,80
9	20,88	38,48	50,00	60,00	41,10
10	20,92	38,56	35,00	50,00	48,20

*Tamanho de Grão Expresso em μm .

Tabela 5 - diferença percentual entre tamanhos de grãos calculado pelos modelos/aplicativos estudados e os valores experimentais obtidos.

Presente Trabalho (Form2D)			Pietrzyk [1] (Forge2 e Experimental)		
Ponto	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	Experimental
1	11%	63%	108%	150%	0%
2	8%	137%	132%	231%	0%
3	39%	205%	161%	291%	0%
4	20%	134%	119%	213%	0%
5	47%	223%	134%	170%	0%
6	29%	56%	33%	100%	0%
7	50%	45%	36%	94%	0%

Presente Trabalho (Form2D)			Pietrzyk [1] (Forge2 e Experimental)		
Ponto	Sellers	Roberts	Sellers	Roberts	Experimental
8	27%	108%	9%	26%	0%
9	49%	6%	22%	46%	0%
10	57%	20%	27%	4%	0%
Media	37%	111%	87%	147%	0%

Seguindo a mesma linha do modelo anterior, realizamos a simulação do forjamento de uma peça genérica um pouco mais complexa, a fim de analisar o comportamento do modelo e comparar os resultados obtidos com aqueles reportados no artigo.

Foi utilizado como peça a ser forjada, um cilindro de dimensões 140 (diâmetro) x 38 (altura) mm, similar ao utilizado por Pietrzyk. O material utilizado foi Aço Carbono 1020. Maiores informações sobre os parâmetros de entrada podem ser observado na tabela 6. Os diagramas de temperatura, deformação e taxa de deformação obtidos podem ser observados nas figuras 5,6,7 e 8.

Tabela 6 - Parâmetros Utilizados na Simulação 5.1.2

Parâmetro de Simulação	Valor Utilizado
Equipamento	Prensa de Pesquisa (4.5 m/s)
Lubrificante	Poland ($\mu=0.1$)
Temperatura da Ferramenta (°C)	400°C
Material	Aço 1020
Temperatura da Peça (°C)	1100
Tempo de Refriamento (s)*	2,3,3

*Os tempos de resfriamento referem-se ao tempo antes da peça entrar na prensa, tempo da peça na prensa (antes do forjamento) e tempo após forjamento (ainda na prensa).

Após a simulação obtivemos os valores de distribuição de temperatura, deformação e taxa de deformação mostrados na tabela 7. Nesta tabela temos também a distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado calculados utilizando as equações de Sellars/Whiteman e Roberts. Os pontos designados como 1,2,3 etc. e seus respectivos valores podem ser localizados sobrepondo a transparência 2 (anexa) às figuras 5,6,7 e 8.

Na tabela 8, temos os valores de tamanho de grão obtidos por nossas simulações (tanto por Sellars/Whiteman e Roberts) lado a lado com os valores fornecidos em [1] (o artigo fornece apenas os valores calculado pelas equações de Roberts). Nesta tabela não fornecemos diferenças percentuais pelo fato de não haver referência no artigo em relação à um forjamento real).

Tabela 7 - Dados de Temperatura, deformação, taxa de deformação e tamanho de grão austenítico recristalizado calculado por Sellars e Roberts, obtidos pela simulação 5.1.2.

Ponto	T.G inic*	Temp. (°C)	T. Deform.	Zener-Hollomon	Deform.	Sellars*	Roberts*
1	67,20	1.020,00	7,70	3,142E+13	0,60	11,74	30,70
2	67,20	952,00	7,70	1,575E+14	0,60	10,67	26,64
3	67,20	905,00	7,70	3,142E+14	1,10	5,61	18,22
4	67,20	925,00	7,70	1,735E+13	1,10	6,66	18,96
5	67,20	1.047,00	7,70	5,074E+13	0,60	11,39	32,38
6	67,20	999,00	7,70	5,349E+14	1,10	5,46	21,85
7	67,20	905,00	2,50	6,531E+14	1,60	3,72	15,62
8	67,20	858,00	2,50	6,531E+14	1,20	4,96	15,99
9	67,20	858,00	2,50	6,531E+14	1,10	5,41	16,56
10	67,20	858,00	2,50	6,531E+14	1,10	5,41	16,56
11	67,20	905,00	2,50	1,737E+14	1,10	5,79	18,22
12	67,20	950,00	16,00	3,440E+14	1,60	3,84	16,95
13	67,20	1.020,00	2,50	1,020E+13	0,60	12,66	30,70
14	67,20	915,00	2,50	1,328E+14	0,60	10,77	24,57
15	67,20	880,00	2,50	3,466E+14	1,10	5,58	17,32
16	67,20	905,00	2,50	1,737E+14	0,60	10,62	24,02

*Tamanho de Grão Expresso em μm .

Tabela 8 - Tabela comparativa entre valores de tamanho de grão* obtidos por simulação 5.1.2 no Form2D e valores obtidos por Pietrzyk utilizando o aplicativo Forge2[1].

Ponto	Presente Trabalho		Pietrzyk [1]
	Sellars	Roberts	Roberts
1	13	32,25	44,00
2	12	29,17	44,00
3	6	18,77	36,00
4	6	19,67	36,00
5	14	33,85	48,00
6	7	22,71	44,00
7	4	16,05	36,00
8	5	15,41	36,00
9	5	15,95	36,00
10	5	15,95	36,00
11	6	19,67	36,00
12	4	18,31	36,00
13	13	32,25	44,00
14	12	29,17	44,00
15	6	17,82	36,00
16	11	26,18	36,00

*Tamanho de Grão Expresso em μm .

Como podemos observar nas tabela 4 e 5, a aplicação das equações de Whiteman/Sellars e Roberts nos dados fornecidos pelo aplicativo Form2D para a obtenção da previsão microestrutural, forneceu-nos resultados bastante satisfatórios, sendo os valores obtidos inclusive mais próximos aos dados experimentais do que os obtidos por Pietrzyk.

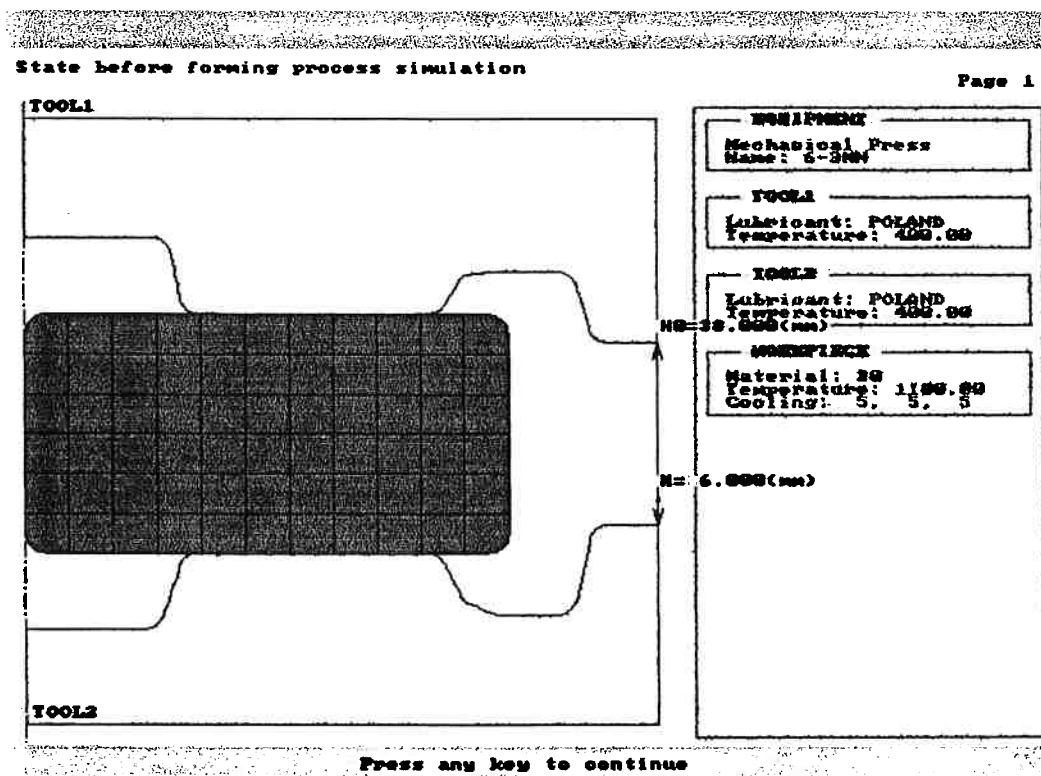


Figura 5 - Geometria e parâmetros de forjamento para simulação 5.1.2

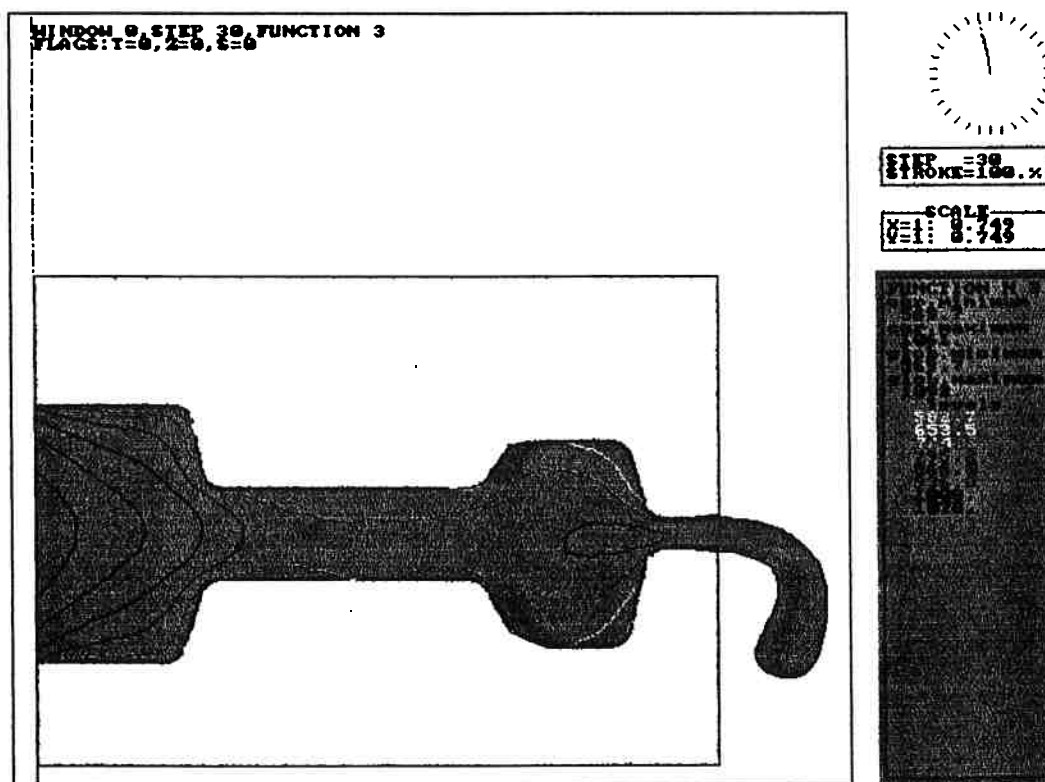


Figura 6 - Perfis de temperatura após forjamento

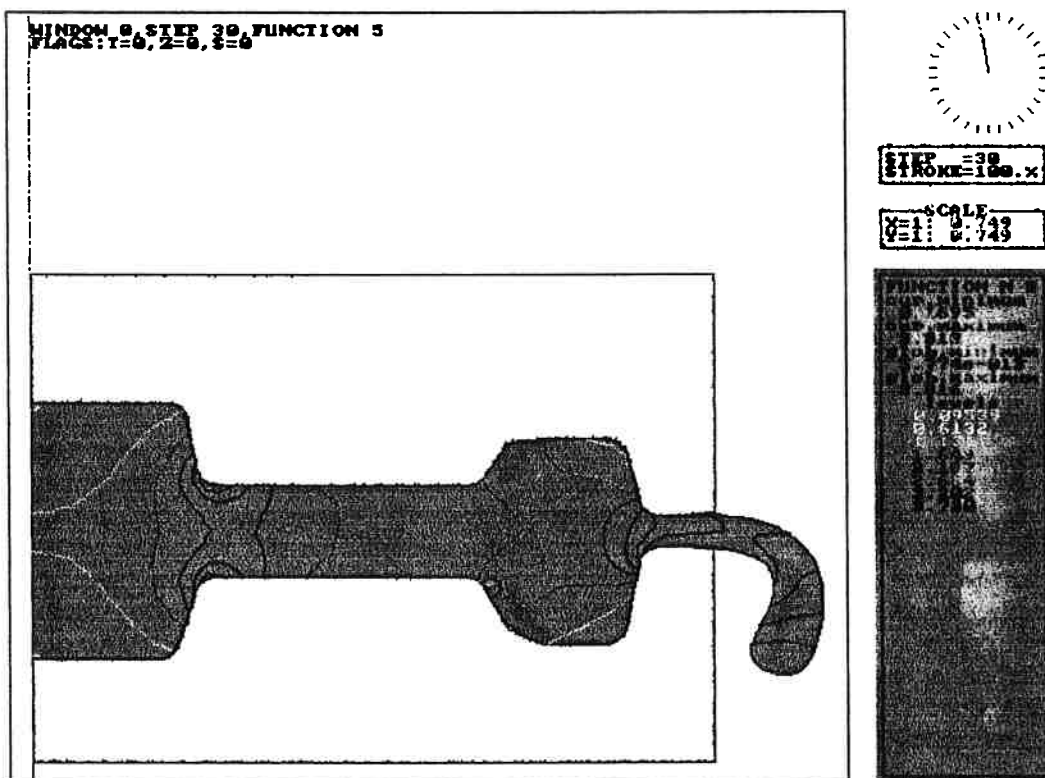


Figura 7 - Perfis de deformação após forjamento

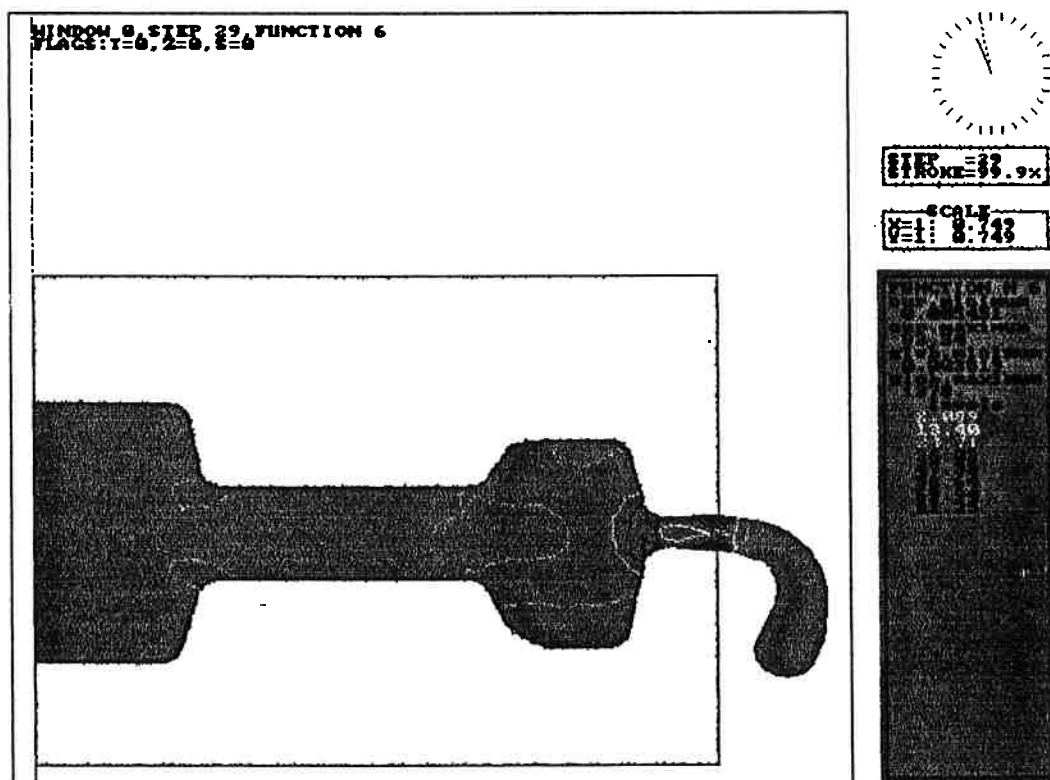


Figura 8 - Perfis de taxa de deformação após forjamento.

Mais interessante ainda é o fato de que o tamanho de grão calculado pelo modelo varia ao longo da peça de forma muito parecida com o que acontece no forjado real, diminuindo a granulometria da periferia para o centro da peça.

Esta verificação é de extrema importância, como afirma Pietrzyk em seu artigo, uma vez que mais importante do que controlar a exata granulometria de uma peça, é poder controlar a distribuição desta, garantido uma homogeneidade da granulometria, ao longo de toda a peça.

Analisando a tabela 8, com os resultados da simulação 5.1.2, podemos observar a mesma tendência da simulação anterior: a equação de Whiteman/Sellars fornecendo valores menores do que a de Roberts, porém ambas com a mesma tendência de menor tamanho de grão na região de maiores deformações.

Outra observação importante é a discrepância dos resultados fornecidos por cada modelo, divergindo de Pietrzyk que obtém valores muito parecidos de ambas as equações em sua simulação de forjamento[1]. Esta discrepância é mais acentuada ainda na simulação 5.1.2, onde as deformações são maiores.

Isto faz com que, no primeiro caso, sejam os valores obtidos por meio da equação de Sellars os mais próximos dos resultados experimentais e, inversamente, no segundo caso, são os resultados fornecidos por Roberts os mais coerentes.

5.3. O Efeito da Variação da Taxa de Extração de Calor

A fim de estudarmos a influência da variação do coeficiente de extração de calor nos modelos de previsão microestrutural, e sua sensibilidade à esta variação, foram realizadas simulações de forjamentos simples onde, mantidos todos os outros parâmetros de processo fixos, variamos aquele que é de interesse do nosso estudo (neste caso, o coeficiente de extração de calor " α "). Para este estudo, foram realizados dois grupos distintos de forjamentos, totalizando 8 simulações.

O primeiro grupo de simulações é derivado daquela do item 5.1.1, onde simulamos o forjamento de uma esfera de aço. Neste grupo foi utilizado como peça a ser forjada, um cilindro de dimensões 30mm (diâmetro) x 50mm (altura). Maiores informações quanto a parâmetros de simulação podem ser encontrados na tabela 9. Os diagramas de temperatura, deformação e taxa de deformação obtidos podem ser observados nas figuras 1A a 16A do anexo I.

Tabela 9 - Parâmetros Utilizados na Simulação 5.2.1 e 5.2.2.

Parâmetro de Simulação	Valor Utilizado
Equipamento	Prensa de Pesquisa (4.5 m/s)
Lubrificante	Poland ($\mu=0.1$)
Temperatura da Ferramenta (°C)	400°C
Material	Aço 1020
Temperatura da Peça (°C)	1100
Tempo de Refriamento (s)*	2,3,3
Taxas de Extração de Calor (13kW/m ² K)	1.3, 13.0, 130.0 e 1300.0

Já no segundo grupo de simulações, a peça a ser forjada (também um cilindro), tinha dimensões 140 (diâmetro) x 38 (altura) mm. Todos os outros parâmetros podem ser encontrados também na tabela 9. Os diagramas de temperatura, deformação e taxa de deformação obtidos podem ser observados nas figuras 1B a 16B do anexo I.

Com base nos coeficientes de extração de calor utilizados por Pietrzyk, Kusiak e Kopp [1;2;3], foram utilizados em nossas simulações, os seguintes coeficientes de extração de calor: 1.3, 13.0, 130.0 e 1300 (kW/m²K).

Após as simulação obtivemos os valores de distribuição de temperatura, deformação e taxa de deformação mostrados nas tabela 1A a 4A e 1B a 4B (anexas). Nas tabela 10 e 11 temos a distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado calculado utilizando as equações de Sellars/Whiteman e Roberts, para as simulações 5.2.1 e 5.2.2, respectivamente. Os pontos 1,2,3 etc. podem ser localizados sobrepondo as transparências 1 e 2 (anexas) às figuras 1A a 16A e 1B a 16B.

Tabela 10 - Distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado*, utilizando diferentes taxas de extração de calor, nas simulações 5.2.1.

Ponto	1,3 KW/m ² K		13 KW/m ² K		130 KW/m ² K		1300 KW/m ² K		Experimental[1]
	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	
1	45,45	62,68	45,5	62,7	43,39	60,84	35,11	56,10	24,00
2	22,62	40,25	21,4	39,0	19,63	36,49	17,13	33,94	15,10
3	16,63	36,47	16,3	35,8	14,84	34,50	13,76	33,34	11,50
4	15,98	35,13	16,0	35,1	14,57	33,85	13,51	32,72	12,80
5	10,37	30,12	10,2	29,9	11,11	30,64	9,79	29,34	11,10
6	16,63	36,47	16,3	35,8	14,84	34,50	13,76	33,34	22,50
7	15,98	35,13	16,0	35,1	14,57	33,85	13,51	32,72	20,60
8	10,37	30,12	10,2	29,9	10,72	30,64	9,79	29,34	23,80
9	30,30	49,59	30,3	49,6	28,93	48,18	28,11	48,18	41,10
10	20,92	38,56	20,9	38,5	19,63	36,49	18,84	35,71	48,20
Média	22,81	43,84	22,57	43,50	21,36	42,22	19,43	40,52	25,63
Desvio	10,54	9,85	10,57	9,94	9,99	9,41	8,57	8,68	12,52

*Tamanho de Grão Expresso em µm.

Tabela 11 - Distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado*, utilizando diferentes taxas de extração de calor, nas simulações 5.2.2.

Ponto	1,3 KW/m2K		13 KW/m2K		130 KW/m2K		1300 KW/m2K		Pietrzyk[1]**
	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	
1	16,7	35,53	13,17	32,256	11,73	30,69	9,59	25,49	44,00
2	15,31	31,99	12,16	29,171	10,67	26,64	9,07	24,08	44,00
3	5,91	17,78	5,91	18,772	5,61	18,21	4,80	17,43	36,00
4	5,97	19,67	6,13	19,678	6,65	18,95	8,53	22,52	36,00
5	14,58	33,85	13,73	33,85	11,39	32,38	10,29	27,24	48,00
6	7,60	23,77	6,90	22,71	5,46	21,85	9,67	25,68	44,00
7	4,40	16,76	4,07	16,05	3,71	15,62	4,96	18,02	36,00
8	3,80	14,10	4,83	15,41	4,95	15,99	4,52	16,40	36,00
9	5,53	16,28	5,26	15,95	5,40	16,56	4,52	16,40	36,00
10	6,09	16,93	5,26	15,95	5,40	16,56	4,52	16,40	36,00
11	6,41	19,67	6,13	19,67	5,79	18,21	5,10	18,50	36,00
12	5,96	21,65	4,06	18,31	3,83	16,94	3,40	17,10	36,00
13	16,72	35,53	13,17	32,25	12,65	30,69	9,59	25,49	44,00
14	15,31	31,99	12,16	29,17	10,77	24,56	2,03	6,20	44,00
15	5,91	17,78	5,69	17,82	5,58	17,32	4,80	17,43	36,00
16	11,75	26,18	11,25	26,18	10,61	24,02	8,53	22,52	36,00
Média	9,25	23,72	8,12	22,70	7,51	21,57	6,50	19,81	39,3
Desvio	4,84	7,63	3,69	6,67	3,14	5,82	2,70	5,36	4,4

*Tamanho de Grão Expresso em μm . **Calculado segundo Roberts.

Analisando as tabela 10 e 11, podemos observar que a influência de variação do coeficiente de extração de calor no tamanho de grão austenítico existe, e se dá como esperado (menores tamanhos de grão para maiores taxas de resfriamento). Porém, sua influência é pequena. Isto denota a baixa sensibilidade de ambos os modelos à este

parâmetro. Podemos notar que mesmo com variações de quatro ordens de grandeza, a granulometria calculada continua coerente com os valores esperados.

Esta informação é de grande valor para este trabalho e para futuros estudos de simulação de forjamento, uma vez que a correta determinação do coeficiente de transferência de calor é um dos grandes problemas enfrentados na indústria. Pode-se afirmar com segurança que o erro ocasionado por uma estimativa imprecisa do coeficiente α não será relevante.

5.3. O Efeito da Variação do Coeficiente de Atrito

A fim de estudarmos a influência da variação do coeficiente de atrito nos modelos de previsão microestrutural, e sua sensibilidade à esta variação, foram realizadas simulações de forjamento simples onde, mantidos todos os outros parâmetros de processo fixos, variamos aquele que é de interesse ao nosso estudo (neste caso, o coeficiente de atrito “ μ ”). Para este estudo, foram realizados dois grupos distintos de forjamentos, totalizando 4 simulações.

O primeiro grupo de simulações é derivado daquela do item 5.1.1, onde simulamos o forjamento de uma esfera de aço. Neste grupo foi utilizado como peça a ser forjada, um cilindro de dimensões 30mm (diâmetro) x 50mm (altura). Maiores informações quanto a parâmetros de simulação podem ser encontrados na tabela 12. Os diagramas de temperatura, deformação e taxa de deformação obtidos podem ser observados nas figuras 17A a 19A, no anexo I.

Note que foi escolhido como coeficiente de transferência de calor o valor de $13\text{kW/m}^2\text{K}$, por ser, logo após $1,3\text{kW/m}^2\text{K}$, aquele que obteve as médias mais próximas aos dados da literatura, além do fato de ser este valor citado em duas das referências utilizadas por este trabalho, facilitando futuras comparações.

Tabela 12 - Parâmetros Utilizados na Simulação 5.3.1 e 5.3.2.

Parâmetro de Simulação	Valor Utilizado
Equipamento	Prensa de Pesquisa (4.5 m/s)
Lubrificante	Poland ($\mu=0.1$) e Sem lub. ($\mu=0.5$)
Temperatura da Ferramenta ($^{\circ}\text{C}$)	400 $^{\circ}\text{C}$
Material	Aço 1020
Temperatura da Peça ($^{\circ}\text{C}$)	1100
Tempo de Resfriamento (s)*	2,3,3
Taxas de Extração de Calor ($13\text{kW/m}^2\text{K}$)	13.0

Já no segundo grupo de simulações, a peça a ser forjada (também um cilindro), tinha dimensões 140 (diâmetro) x 38 (altura) mm. Todos os outros parâmetros podem ser encontrados também na tabela 12. Os diagramas de temperatura, deformação e taxa de deformação obtidos podem ser observados nas figuras 17B a 19B, do anexo I.

Com base nos coeficientes de atrito citados Reiner Kopp[4], para aços, à temperatura de 1000°C, foram utilizados em nossas simulações, os seguintes coeficientes de atrito: 0.1 (com lubrificante) e 0.5 (sem lubrificante).

Após as simulação obtivemos os valores de distribuição de temperatura, deformação e taxa de deformação mostrados nas tabelas 6A e 6B (anexo II). Nas tabela 13 e 14 temos a distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado calculado utilizando as equações de Sellars/Whiteman e Roberts, referentes às simulações 5.3.1 e 5.3.2, respectivamente. Os pontos 1,2,3 etc.

Tabela 13 - Distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado*, utilizando diferentes coeficientes de atrito, nas simulações 5.3.1.

Ponto	$\mu = 0.1$		$\mu = 0.5$		Experimental[1]
	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	
1	45,45	62,68	42,98	64,53	24,00
2	21,42	39,02	20,73	41,61	15,10
3	16,30	35,80	14,74	35,81	11,50
4	15,98	35,13	13,81	35,16	12,80
5	10,23	29,91	11,39	32,04	11,10
6	16,30	35,80	14,74	35,81	22,50
7	15,98	35,13	13,81	35,16	20,60
8	10,23	29,91	11,39	32,04	23,80
9	30,30	49,59	42,98	64,53	41,10
10	20,88	38,48	20,38	40,77	48,20
Média	22,57	43,50	22,99	46,39	25,63
Desvio	10,57	9,94	12,17	12,41	12,52

*Tamanho de Grão Expresso em μm .

Tabela 14 - Distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado*, utilizando diferentes coeficientes de atrito, na simulação 5.3.1.

Ponto	$\mu = 0.1$		$\mu = 0.5$		Pietrzyk[1]**
	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	
1	13,18	32,26	13,60	31,32	44,00
2	12,17	29,17	12,26	29,47	44,00
3	5,91	18,77	7,68	21,45	36,00
4	6,14	19,68	7,68	21,45	36,00
5	13,73	33,85	13,24	30,98	48,00
6	6,90	22,72	8,70	24,40	44,00
7	4,07	16,05	13,25	28,57	36,00
8	4,83	15,42	12,07	25,51	36,00
9	5,27	15,95	12,07	25,51	36,00
10	5,27	15,95	6,58	19,22	36,00
11	6,14	19,68	7,42	21,89	36,00
12	4,07	18,31	14,97	34,76	36,00
13	13,18	32,26	17,28	34,48	44,00
14	12,17	29,17	3,65	6,21	44,00
15	5,70	17,82	7,68	21,45	36,00
16	11,25	26,19	12,80	27,45	36,00
Média	8,12	22,70	10,68	25,26	39,3
Desvio	3,70	6,67	3,67	6,99	4,4

*Tamanho de Grão Expresso em μm . **Calculado segundo Roberts.

Analisando as tabelas 13 e 14, podemos observar uma ligeira tendência de aumento do tamanho de grão com o aumento do coeficiente de atrito. Mas este, assim como no caso do coeficiente de transferencia de calor, não é tão determinante quanto a

deformação real. Este pequeno aumento do tamanho de grão pode ser explicado pelo aquecimento da peça devido ao atrito com a matriz durante a conformação.

Com uma variação de 500% no coeficiente μ , obtivemos um aumento no tamanho de grão da ordem de 11% (para o modelo de Roberts) e 30% (para o modelo de Sellars), um erro que pode ser considerado tolerável quando estivermos escolhendo os valores dos parâmetros de uma simulação de forjamento.

5.5. O Efeito da Utilização de Diferentes Equipamentos

A fim de estudarmos a influência da variação da velocidade da prensa nos modelos de previsão microestrutural, e sua sensibilidade à esta variação, foram realizadas simulações de forjamentos simples onde, mantidos todos os outros parâmetros de processo fixos, variamos aquele que é de interesse do nosso estudo (neste caso, o equipamento utilizado). Para este estudo, foram realizados dois grupos distintos de forjamentos, totalizando 8 simulações.

O primeiro grupo de simulações é derivado daquela do item 5.1.1, onde simulamos o forjamento de uma esfera de aço. Neste grupo foi utilizado como peça a ser forjada, um cilindro de dimensões 30mm (diâmetro) x 50mm (altura). Maiores informações quanto a parâmetros de simulação podem ser encontrados na tabela 15. Os diagramas de temperatura, deformação e taxa de deformação obtidos podem ser observados nas figuras 21A a 24A, no anexo I.

Note que foi utilizado como coeficiente de atrito o valor de 0.1, por ser este o valor testado mais próximo do praticado na indústria. Assim como no item anterior, utilizamos o coeficiente de extração de calor 13 kW/m²K.

Tabela 15 - Parâmetros Utilizados na Simulação 5.2.1 e 5.2.2.

Parâmetro de Simulação	Valor Utilizado
Equipamento	Prensa de Pesq. (4.5 m/s) e Martelo (20 m/s)
Lubrificante	Poland ($\mu=0.1$)
Temperatura da Ferramenta (°C)	400°C
Material	Aço 1020
Temperatura da Peça (°C)	1100
Tempo de Resfriamento (s)*	2,3,3
Taxas de Extração de Calor (kW/m ² K)	13.0

Já no segundo grupo de simulações, a peça a ser forjada (também um cilindro), tinha dimensões 140 (diâmetro) x 38 (altura) mm. Todas os outros parâmetros podem ser

encontrados também na tabela 15. Os diagramas de temperatura, deformação e taxa de deformação obtidos podem ser observados nas figuras 21B a 24B, no anexo I.

Com base nas velocidades de prensas utilizadas por Pietrzyk, Kusiak e Kopp em seus artigos[1;2;3], foram utilizados em nossas simulações, as velocidades de 4,5 e 20 m/s.

Após as simulação obtivemos os valores de distribuição de temperatura, deformação e taxa de deformação mostrados nas tabela 5A e 5B (anexo II). Nas tabela 16 e 17 temos a distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado calculado utilizando as equações de Sellars/Whiteman e Roberts, para as simulações 5.2.1 e 5.2.2, respectivamente.

Tabela 16 - Distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado*, utilizando diferentes equipamentos, nas simulações 5.4.1.

Ponto	Prensa de Pesquisa		Martelo		Experimental[1]
Ponto	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	
1	45,45	62,68	26,46	57,54	24,00
2	21,42	39,02	15,65	41,94	15,10
3	16,30	35,80	16,20	44,57	11,50
4	15,98	35,13	10,58	34,50	12,80
5	10,23	29,91	9,10	32,27	11,10
6	16,30	35,80	9,97	34,19	22,50
7	15,98	35,13	9,77	33,07	20,60
8	10,23	29,91	9,10	32,27	23,80
9	30,30	49,59	31,75	64,00	41,10
10	20,88	38,48	14,12	39,24	48,20
Média	22,57	43,50	16,97	45,95	25,63
Desvio	10,57	9,94	7,86	11,17	12,52

*Tamanho de Grão Expresso em μm .

Tabela 17 - Distribuição do tamanho de grão austenítico recristalizado*, utilizando diferentes equipamentos, nas simulações 5.4.1.

Ponto	Prensa de Pesquisa		Martelo		Pietrzyk[1]**
	Sellars	Roberts	Sellars	Roberts	
1	13,18	32,26	11,25	33,85	44,00
2	12,17	29,17	11,80	36,35	44,00
3	5,91	18,77	5,63	23,82	36,00
4	6,14	19,68	5,69	24,85	36,00
5	13,73	33,85	11,25	33,85	48,00
6	6,90	22,72	6,75	26,04	44,00
7	4,07	16,05	4,22	20,82	36,00
8	4,83	15,42	5,05	22,04	36,00
9	5,27	15,95	5,75	22,55	36,00
10	5,27	15,95	5,75	22,55	36,00
11	6,14	19,68	5,77	22,72	36,00
12	4,07	18,31	3,70	19,15	36,00
13	13,18	32,26	11,25	33,85	44,00
14	12,17	29,17	11,25	33,85	44,00
15	5,70	17,82	5,13	20,84	36,00
16	11,25	26,19	10,65	31,00	36,00
Média	8,12	22,70	7,56	26,76	39,3
Desvio	3,70	6,67	3,03	5,92	4,4

*Tamanho de Grão Expresso em μm .

Observando as tabelas 16 e 17 podemos notar que os modelos estudados são influenciados de maneira diferente pelo aumento da velocidade do equipamento. Pelo modelo de Sellars/Whiteman, o aumento da velocidade leva a um refinamento da granulometria. Já pelo modelo de Roberts, o aumento da velocidade da prensa leva a um aumento do tamanho de grão austenítico.

Esta constatação pode ser explicada pela diferente natureza dos modelos, combinado com o efeito da variação da velocidade da prensa nos valores finais de temperatura, deformação e taxa de deformação.

O modelo de Whiteman/Sellars recebe, como um de seus dados de entrada, o parâmetro de Zenner-Hollomon (equação 2.1.3) que, por sua vez, é diretamente proporcional à taxa de deformação real. Assim sendo, temos, com o aumento da taxa de deformação (um dos principais efeitos do aumento da velocidade de conformação), um refinamento do grão.

O modelo de Roberts, por sua vez, não considera a taxa de deformação e é influenciado basicamente pela temperatura e pela deformação real. Como podemos observar nas tabelas 38 a 41 do anexo II, o aumento da velocidade da prensa, não aumenta a deformação real, porém tem um efeito visível na temperatura final da peça. Isto se dá devido a dois fatores: o tempo reduzido de contato peça/matriz, ocasionando menos perdas térmicas e a geração de calor devido à alta velocidade de deformação. Como pode-se observar nas tabelas 16 e 17, isto leva, segundo o modelo de Roberts, a um aumento do tamanho de grão.

Mais importante do que estas observações é a constatação de que em situações diferentes, os dois modelos podem ter comportamento diferenciado. Observa-se isto desde a primeira simulação analisada neste trabalho.

O que se percebe é que para forjamentos com níveis de deformação mais elevados, o modelo de Whiteman/Sellars leva a tamanhos de grão demasiadamente pequenos, fugindo dos valores encontrados em processos reais, perdendo em confiabilidade para o modelo de Roberts. O mesmo modelo porém (Whiteman/Sellars), obtém resultados mais próximos aos experimentais quando tratamos de forjamentos com níveis mais baixos de deformação. Outros fatores como, por exemplo, a velocidade da prensa também devem ser levados em consideração na escolha de um modelo de previsão microestrutural.

5.5 O Efeito da Geometria da Matriz Sobre a Distribuição Granulométrica

J. Kusiak[2] e R. Kopp[3] mostraram, por meio de simulações de Elementos Finitos, a influência da geometria da matriz de pré-forma na distribuição final da granulometria pela peça forjada.

Este é o objetivo destes dois últimos grupo de simulações. Para isto, realizamos os mesmos forjamentos simulados pelos autores citados acima. O primeiro grupo consiste de um modelo axisimétrico, a ser forjada em duas etapas. Os pré-forjamentos foram realizados com quatro diferentes matrizes, idênticas a não ser por uma de suas paredes, que assume as formas linear, côncava, convexa e côncava-convexa em cada uma das simulações. Esta formas podem ser vistas na figuras 9, 10, 11 e 12. Os parâmetros de simulação podem ser vistos na tabela 18.

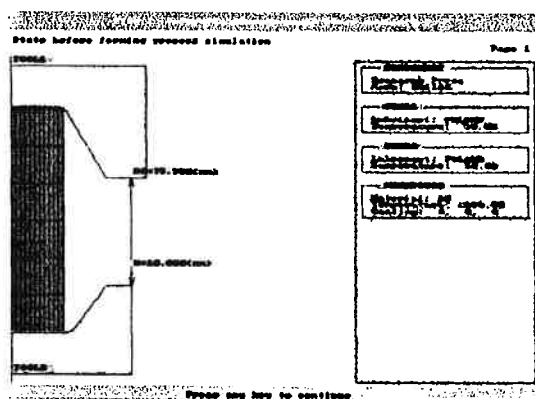


Figura 9 - Matriz de pré-forma com parede linear 5.5.1.

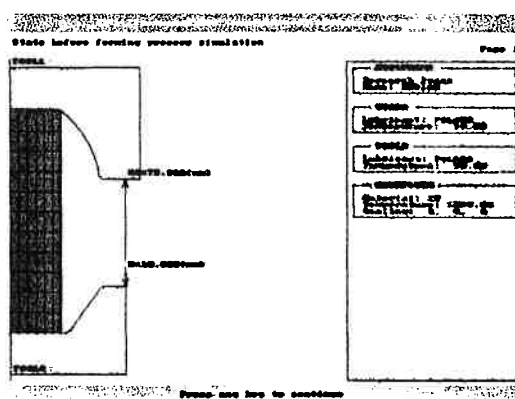


Figura 10 - Matriz de pré-forma com parede convexa 5.5.2.

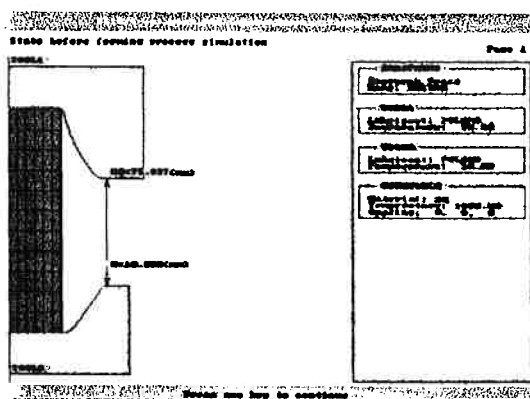


Figura 11 - Matriz de pré-forma com parede côncava 5.5.3.

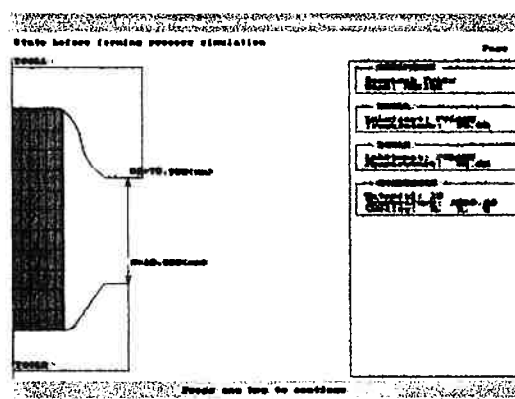


Figura 12 - Matriz de pré-forma com parede côncava-convexa 5.5.4.

Podemos observar os tamanhos de grãos calculados pela equação de Roberts para as quatro peças finais, utilizando as diferentes matrizes de pré-forma, lado a lado com os resultados obtidos por Kusiak[3] na tabela 19.

Tabela 18 - Parâmetros Utilizados na Simulação 5.5.1 a 5.5.4.

Parâmetro de Simulação	Valor Utilizado
Equipamento	Prensa de Pesquisa (4.5 m/s)
Lubrificante	Poland ($\mu=0.1$)
Temperatura da Ferramenta (°C)	50°C
Material	Aço 1020
Temperatura da Peça (°C)	1080
Tempo de Resfriamento (s)*	2,3,3
Taxas de Extração de Calor (kW/m ² K)	13.0

Tabela 19 - Resultados* obtidos com utilização e diferentes matrizes de pré-forma (5.5.1 a 5.5.4), ao lado dos resultados obtidos por Kusiak.

Ponto	Parede Linear		Parede Côncava		Parede Convexa		P. Conc.-Convexa	
	*	Kusiak	*	Kusiak	*	Kusiak	*	Kusiak
1	20,24	35	15,24	25	13,22	40	15,73	30
2	15,15	25	10,15	20	12,81	25	9,41	22
3	21,85	22	21,99	22	20,64	25	19,15	22
4	13,85	20	15,03	20	13,54	20	12,96	18
5	13,31	18	11,53	15	11,80	17	9,48	16
6	19,38	20	17,60	22	17,19	20	20,57	22
7	12,21	20	11,61	20	9,97	18	12,56	18
8	12,27	18	7,46	15	7,08	16	8,37	15
9	12,81	25	8,27	22	11,84	25	10,51	22

Ponto	Parede Linear		Parede Côncava		Parede Convexa		P. Conc.-Convexa	
	*	Kusiak	*	Kusiak	*	Kusiak	*	Kusiak
Média	15,67	22,56	13,21	20,11	11,90	22,89	13,19	20,56
Desvio	3,77	5,34	4,69	3,30	4,56	7,32	4,41	4,50

*Tamanho de Grão Expresso em μm .

O segundo grupo de simulações foi baseado nas experiências de Reiner Kopp[3], consistindo do forjamento de uma peça planar (a haste de uma biela), utilizando duas matrizes de pré-forma diferentes. Estas matrizes podem ser vistas nas figuras 13 e 14.

O objetivo é verificar a afirmação de Kopp de que uma distribuição mais racional da deformação total entre a pré-forma e o forjamento final. Para isto, foram realizadas duas simulações. Na primeira, quase toda a conformação acontece durante a pré-forma, com pouca deformação na etapa final. Já na segunda simulação, a deformação é melhor distribuída entre as duas etapas de forjamento, visando uma melhor distribuição do tamanho de grão. Os parâmetros de simulação podem ser vistos na tabela 20. Os valores de temperatura, deformação e taxa de deformação podem ser encontrados na tabelas 1D e 2D, no anexo II.

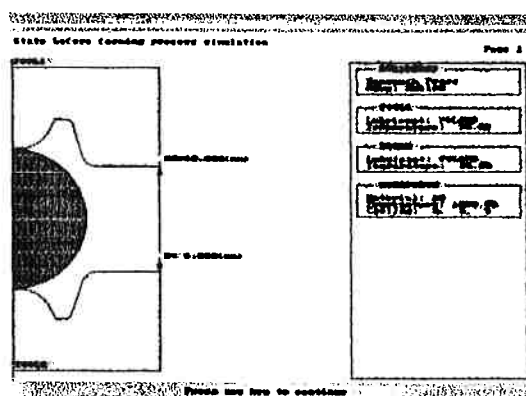


Figura 13 - Matriz de pré-forma 5.5.5.

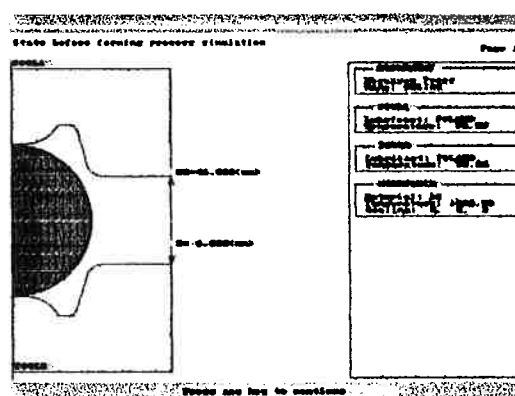


Figura 14 - Matriz de pré-forma 5.5.6.

Tabela 20 - Parâmetros Utilizados na Simulação 5.5.5 e 5.5.6.

Parâmetro de Simulação	Valor Utilizado
Equipamento	Prensa de Pesquisa (4.5 m/s)
Lubrificante	Poland ($\mu=0.1$)
Temperatura da Ferramenta (°C)	50°C
Material	Aço 1020
Temperatura da Peça (°C)	1260
Tempo de Resfriamento (s)*	2,3,3
Taxas de Extração de Calor (kW/m ² K)	13.0

Podemos observar os tamanhos de grãos calculados pela equação de Roberts para as duas peças finais, utilizando as diferentes matrizes de pré-forma na tabela 21.

Tabela 21 - Resultados* obtidos com a utilização e diferentes matrizes de pré-forma simulações 5.5.5 e 5.5.6.

Ponto	Molde 1	Molde 2
1	16,96	14,09
2	20,01	14,09
3	15,00	12,50
4	20,25	16,89
5	13,50	16,89
6	19,00	16,89
7	23,15	16,89
8	21,35	16,89
9	14,64	11,35
10	20,25	14,27
11	16,96	13,21
12	19,44	13,21
Média	18,38	14,77
Desvio	2,95	2,03

*Tamanho de Grão Expresso em μm .

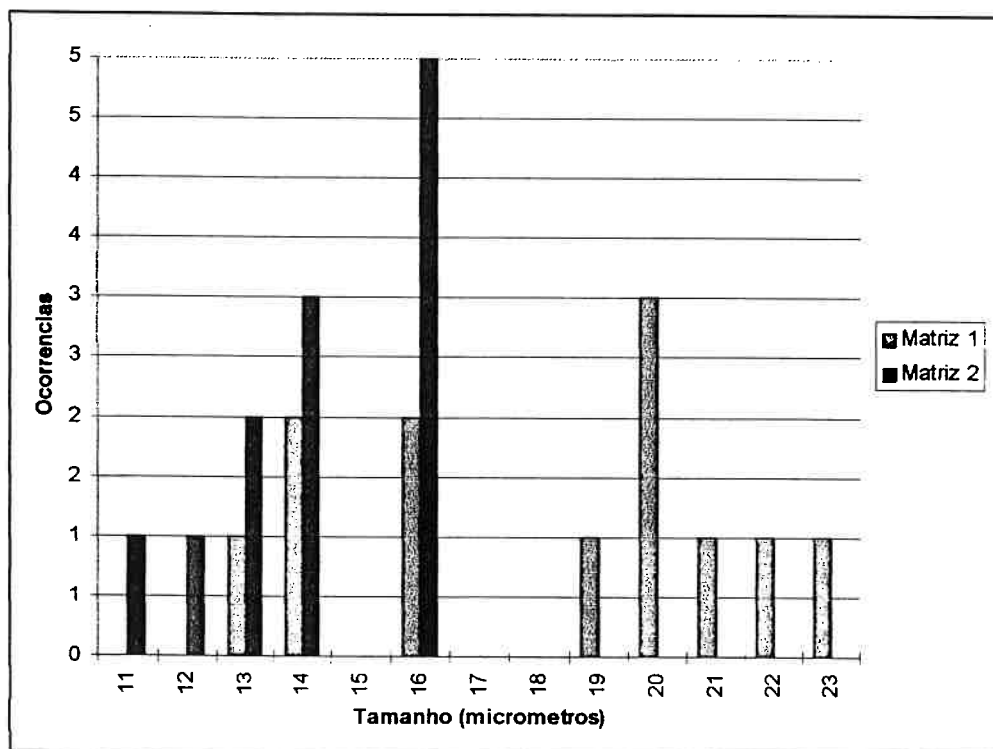


Figura 15 - Distribuição do Tamanho de grão austenítico para as matrizes 1 e 2 (5.5.5 e 5.5.6).

Como podemos perceber analisando a tabela 19, como observado por Kusiak, a geometria da matriz de pré-forma influencia na granulometria da peça. Porém, pela natureza das simulações, é difícil quantificar esta relação.

Analisando a tabelas 21, juntamente com a figura 15, podemos observar a melhoria na homogeneização da granulometria. No primeiro caso (matriz 1), temos uma ocorrência de tamanhos de grão de 13 a 23 μm . No segundo caso (matriz 2), temos uma concentração de tamanhos de grão entre os valores 11 e 16, estando 75% destas ocorrências entre 14 e 16 μm .

Estas constatações nos levam a confirmar o que Reiner Kopp afirma em seu artigo[3]: podemos melhorar a qualidade microestrutural de uma peça forjada projetando melhor as matrizes de forjamento, e os Modelos de Elementos Finitos permitem que façamos isto de maneira mais rápida.

6. Conclusões

Durante o decorrer deste trabalho mostramos a habilidade do Modelo de Elementos Finitos, em conjunto com o modelo microestrutural em estudo, de prever a evolução microestrutural, de forma não só qualitativa, mas também quantitativa, desde que observado o domínio ao qual cada modelo é aplicável.

Além disto, mostramos que os coeficientes de transferência de calor e de atrito não são de grande influência para os modelos estudados, não causando grandes variações nos tamanhos de grão calculados.

Durante o estudo da influência da velocidade de conformação sobre os modelos, porém, foram detectadas discrepâncias entre os dois modelos, sugerindo que cada um deles tenha seus pontos fortes sob diferentes parâmetros de processo. Maiores estudos são necessários para determinar sob que condições de contorno cada um dos modelos é melhor aplicado.

Também relevante à este trabalho é a possibilidade de utilização do modelo de previsão microestrutural para o projeto de matrizes de forjamento, visando a melhoria da qualidade microestrutural de peças forjadas.

Durante a realização do trabalho foram detectadas dificuldades em relação à coleta e análise de dados. Isto se deveu ao fato de que o aplicativo Form2D não fornece de maneira direta os dados de temperatura, deformação ou taxa de deformação, para posterior tratamento, devendo os mesmos serem retirados de forma indireta, como feito aqui.

Desta dificuldade operacional surge a dificuldade analítica, uma vez que os dados são discretos e esparsos. O ideal seria implementar diretamente no código do software Form2D o modelo de previsão microestrutural, assim como fez Kusiak[2].

7. Bibliografia

- [1] M. Pietrzyk, Z. Kedzierski, M. Glowacki, H. Kusiak e J. Sinczak: Validation of the Thermomechanical Microstructural Model for Closed-die Forging. Steel Reserch, 65 (1994) No. 3. Pag 94.
- [2] J. Kusiak, M. Pietrzyk e J. Chenot: Die Shape and Evaluation of Microstructure Control in the Closed-die Axisymmetric Forging by Using Forge2 Program. ISIJ International, vol 34 (1994) No. 9, Pag 755.
- [3] K. Karhausen e R. Kopp: Improvement of Microstructure in Forging of a Connecting Rod by Means of Finite Element Simulations. Stell Reserch, 66 (1995) No. 1. Pag 20.
- [4] R. Kopp e F. Philipp: Physical Parameters and Boundary Conditions for the Numerical Simulation of Hot Forming Processes. Steel Reserch, 63 (1992) No. 9. Pag 392.

1A

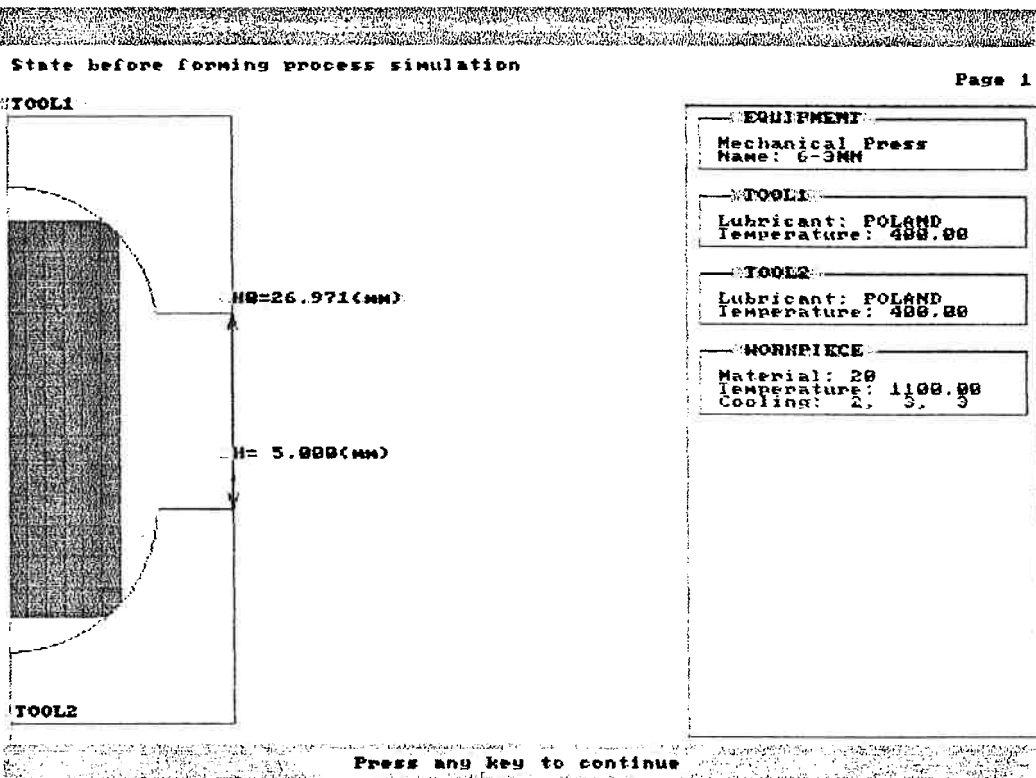


Figura 1 - Parâmetros iniciais da simulação 5.2.1. ($\alpha = 1,3 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

2A

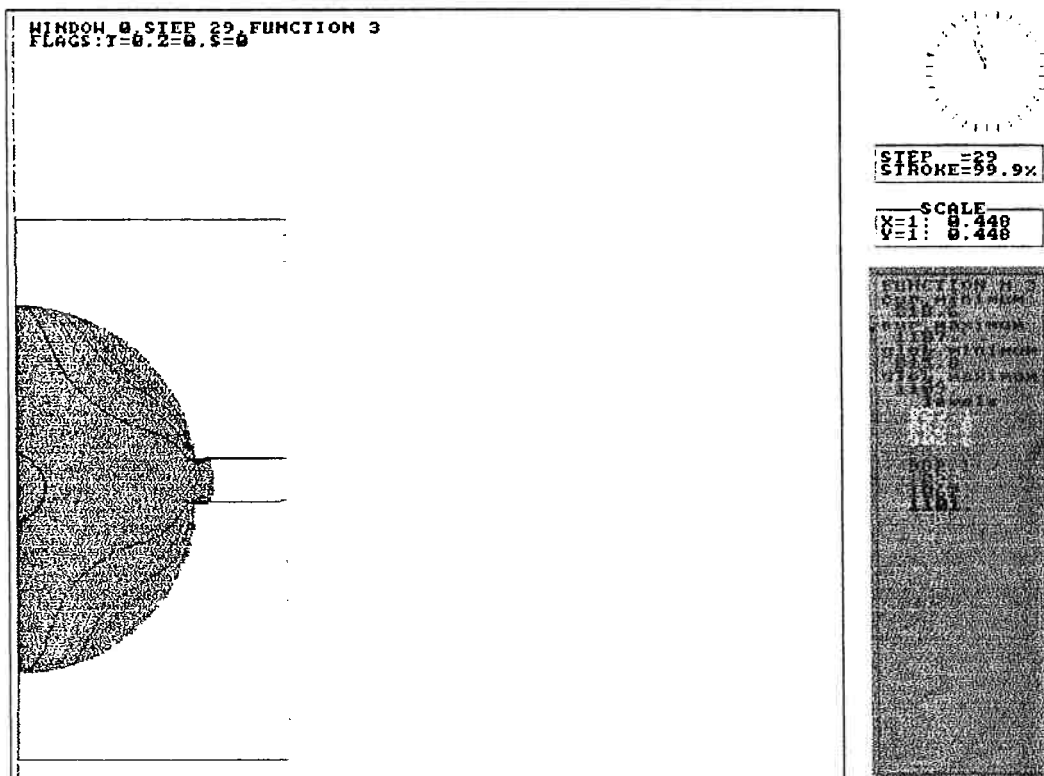


Figura 2 - Perfis de Temperatura para simulação 5.2.1. ($\alpha = 1,3 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

3A

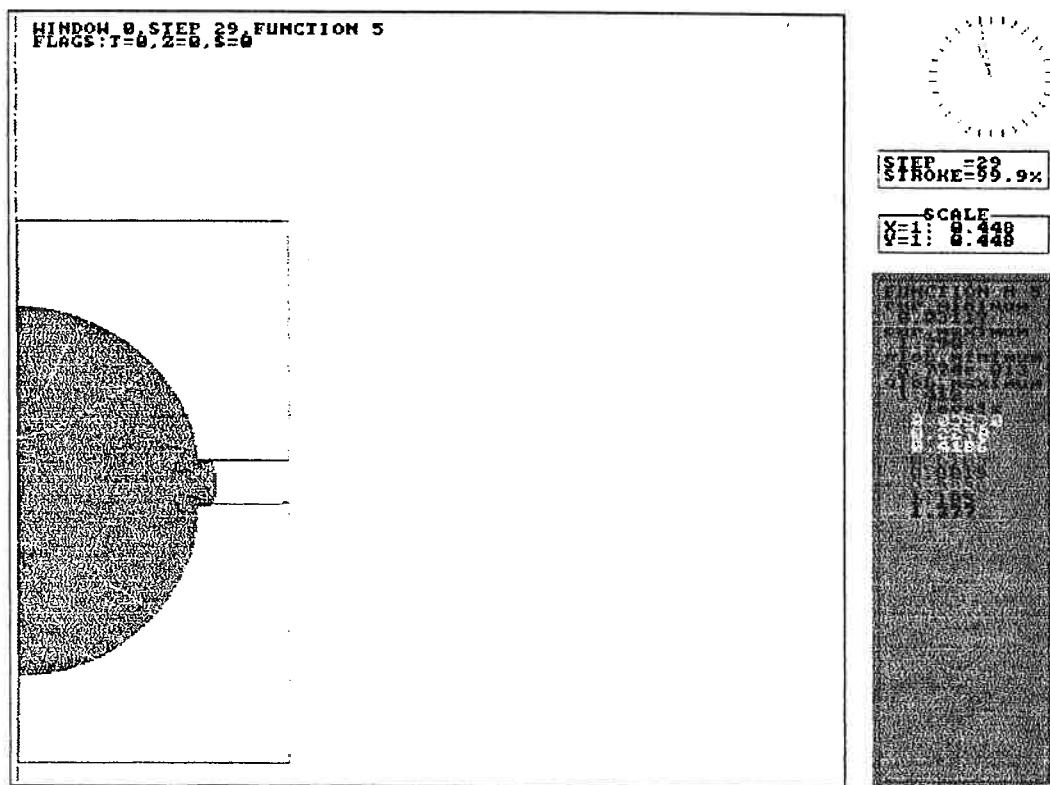


Figura 3 - Perfis de deformação para simulação 5.2.1. ($\alpha=1,3 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

42

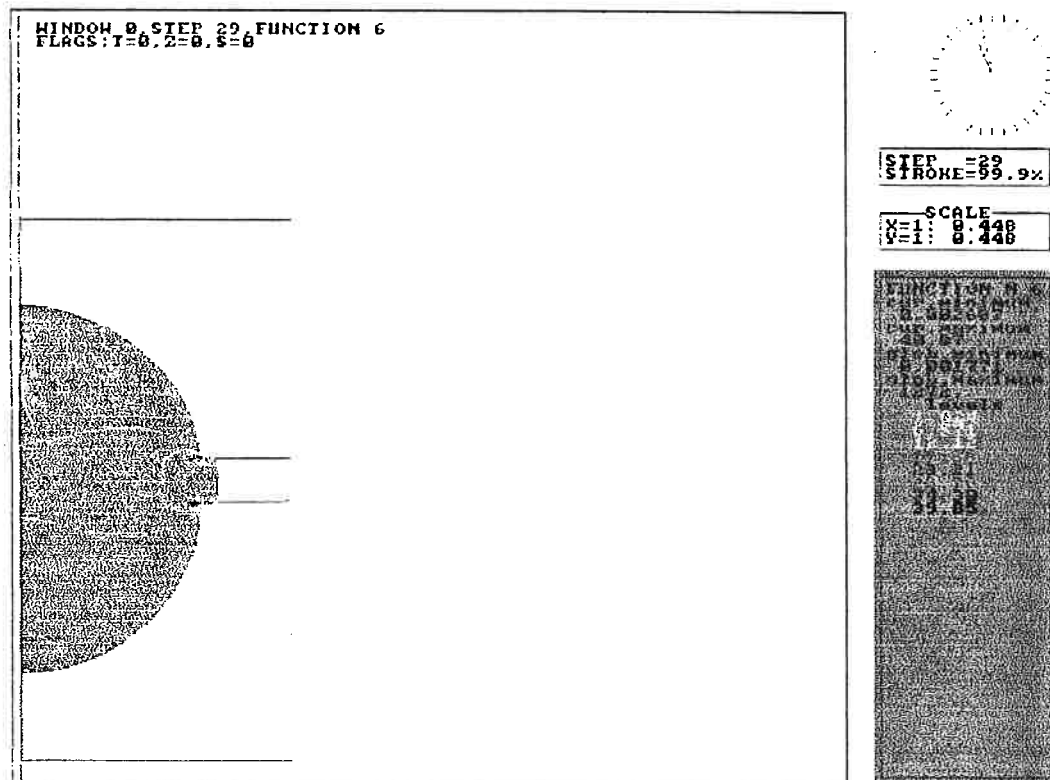


Figura 4 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.2.1. ($\alpha=1,3 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

7A

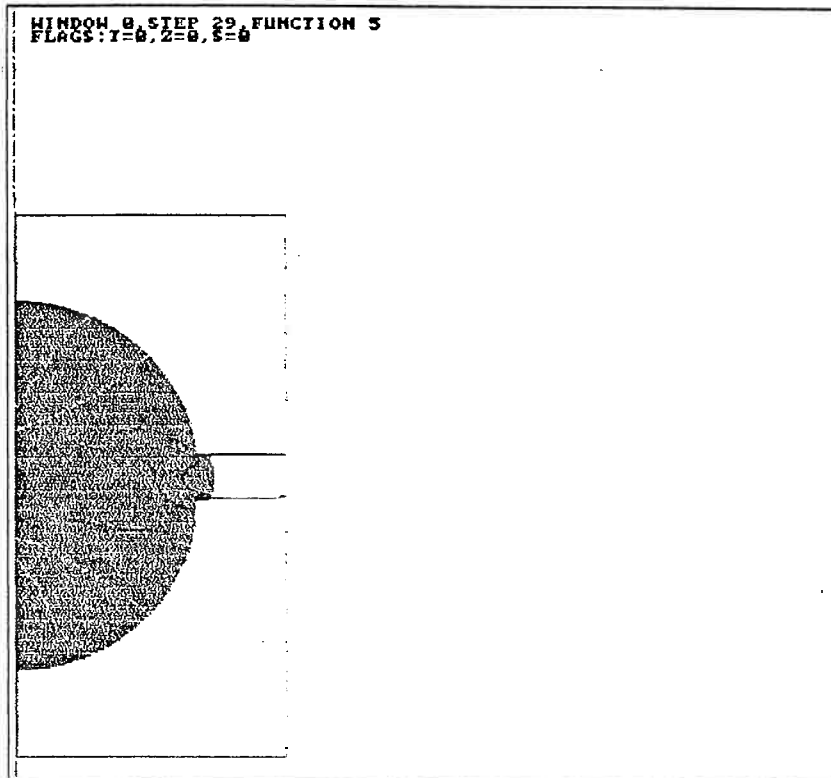
STEP=29
STROKE=99.9%SCALE
X=1: 8.448

Figura 7 - Perfis de deformação para simulação 5.2.1. ($\alpha=13,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

8A

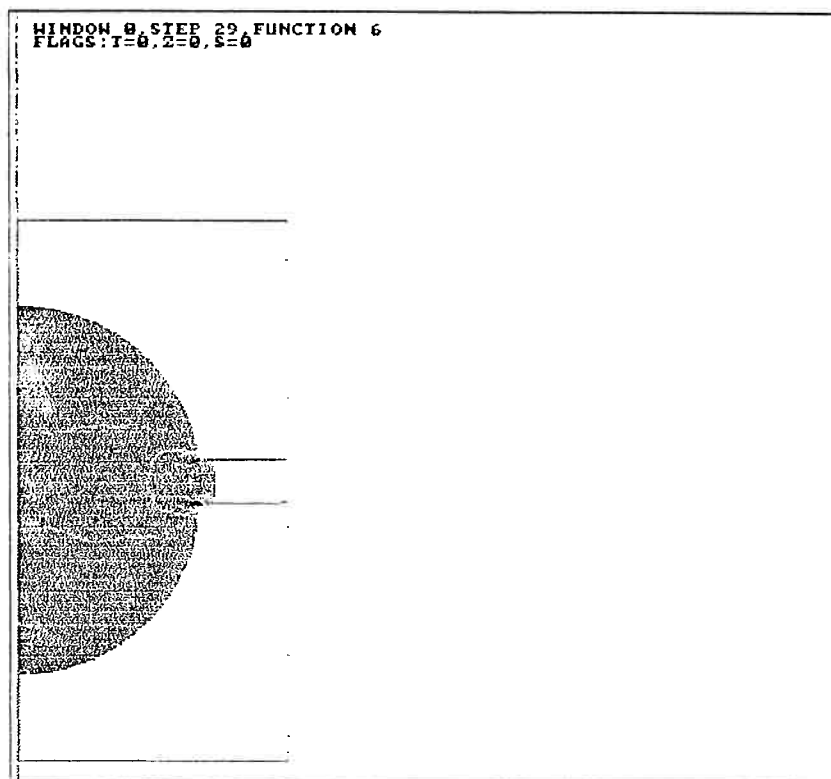
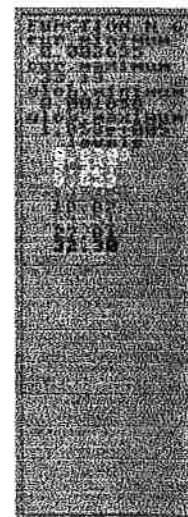
STEP=29
STROKE=99.9%SCALE
X=1: 8.448

Figura 8 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.2.1. ($\alpha=13,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

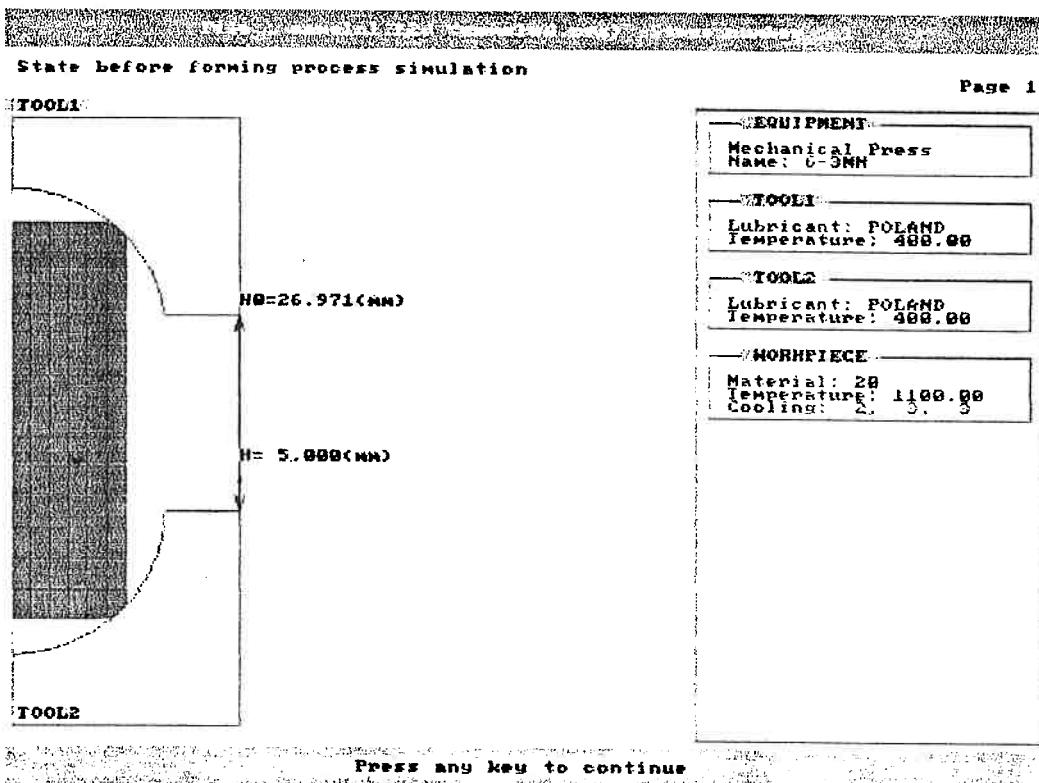


Figura 9 - Parâmetros iniciais da simulação 5.2.1. ($\alpha=130,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

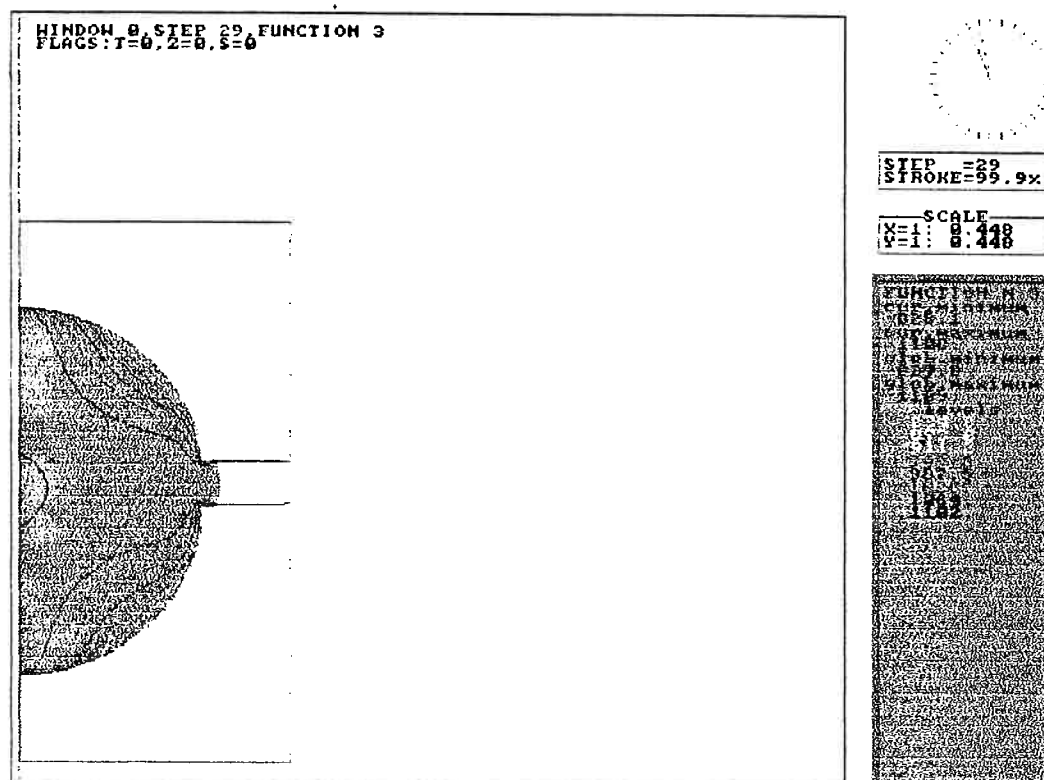


Figura 10 - Perfis de Temperatura para simulação 5.2.1. ($\alpha=130,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

11/

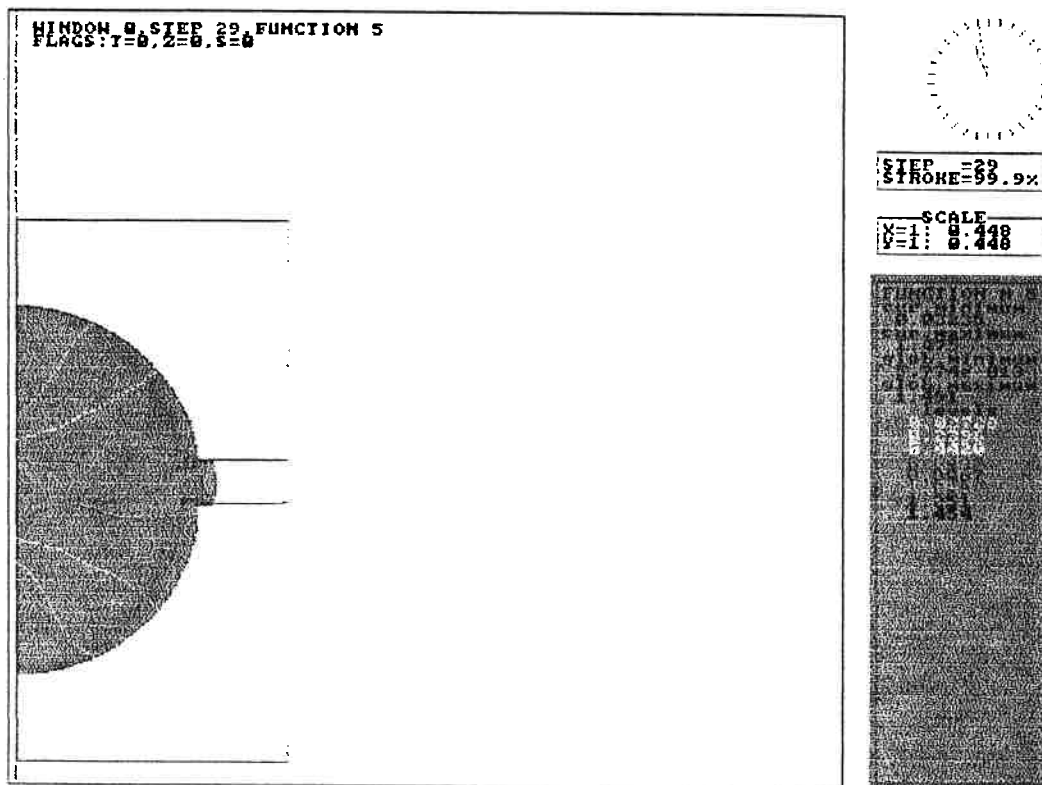


Figura 11 - Perfis de deformação para simulação 5.2.1. ($\alpha=130,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

12/

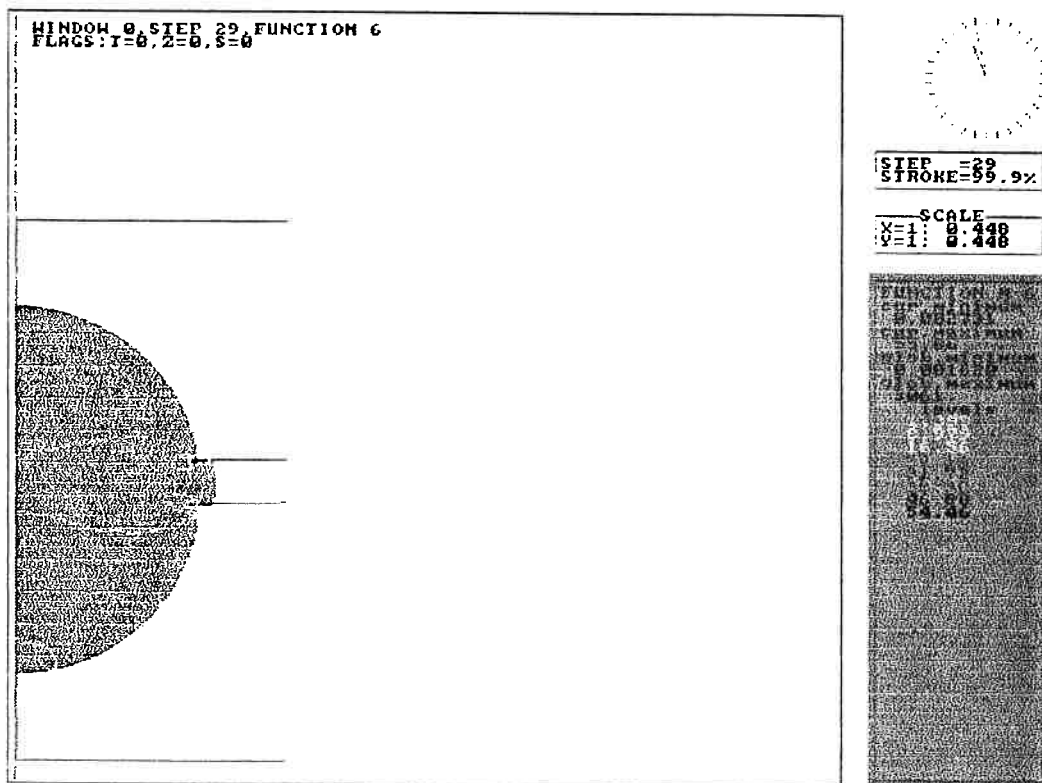


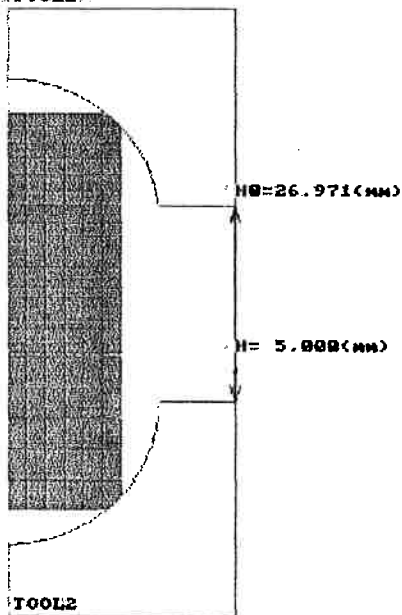
Figura 12 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.2.1. ($\alpha=130,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

13A

State before forming process simulation

Page 1

TOOL1:

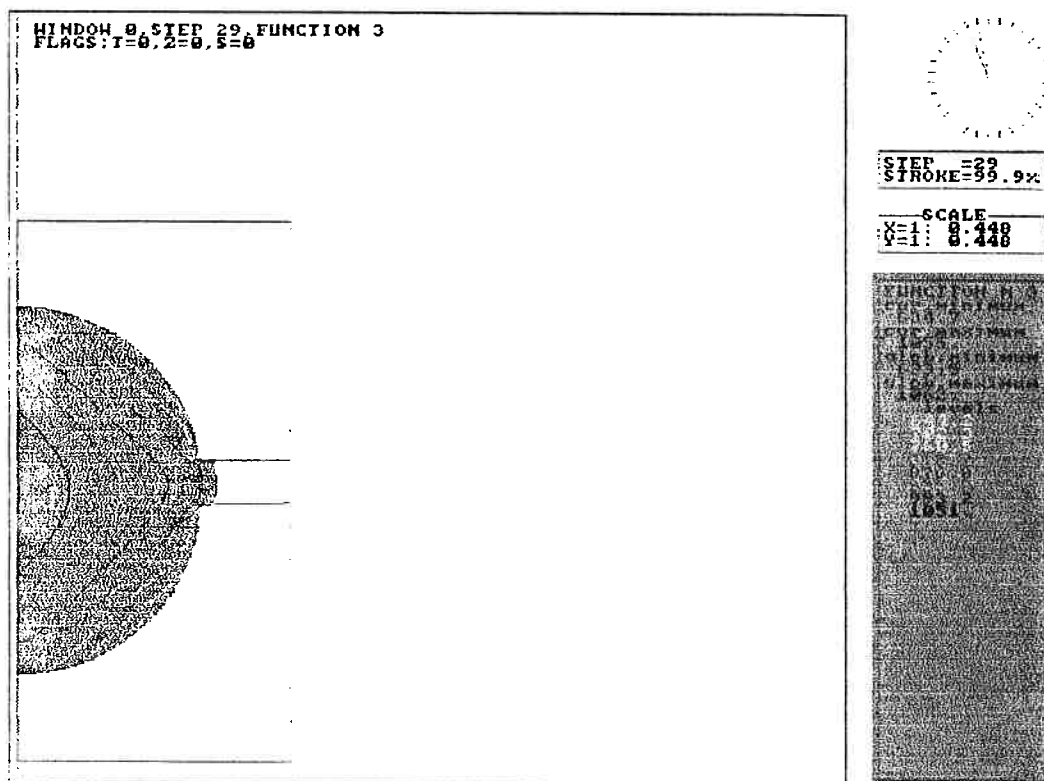


EQUIPMENT	
Mechanical Press	
Name: C-3MN	
TOOL1	
Lubricant: POLAND	
Temperature: 488.88	
TOOL2	
Lubricant: POLAND	
Temperature: 488.88	
WORKPIECE	
Material: 28	
Temperature: 1188.88	
Cooling: 2. 3. 3	

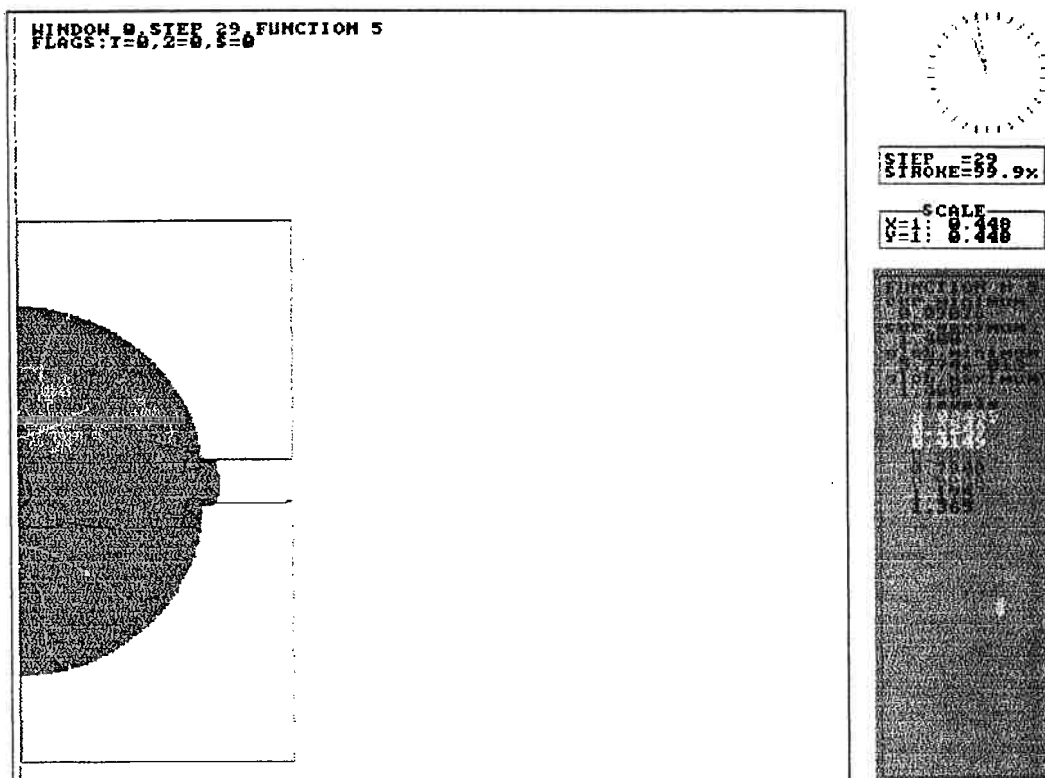
Press any key to continue

Figura 13 - Parâmetros iniciais da simulação 5.2.1. ($\alpha=1300,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

14L

Figura 14 - Perfis de Temperatura para simulação 5.2.1. ($\alpha=1.3 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

154

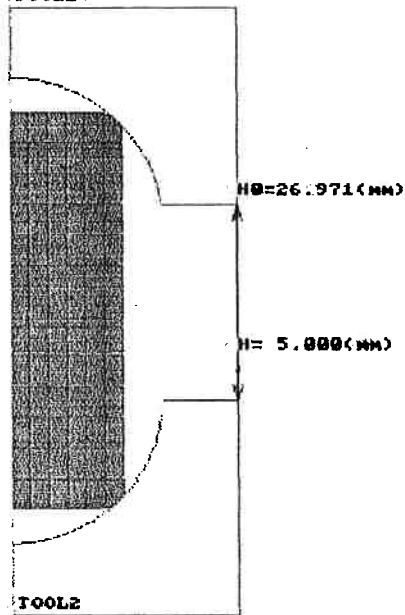


17A

State before forming process simulation

Page 1

TOOL1:

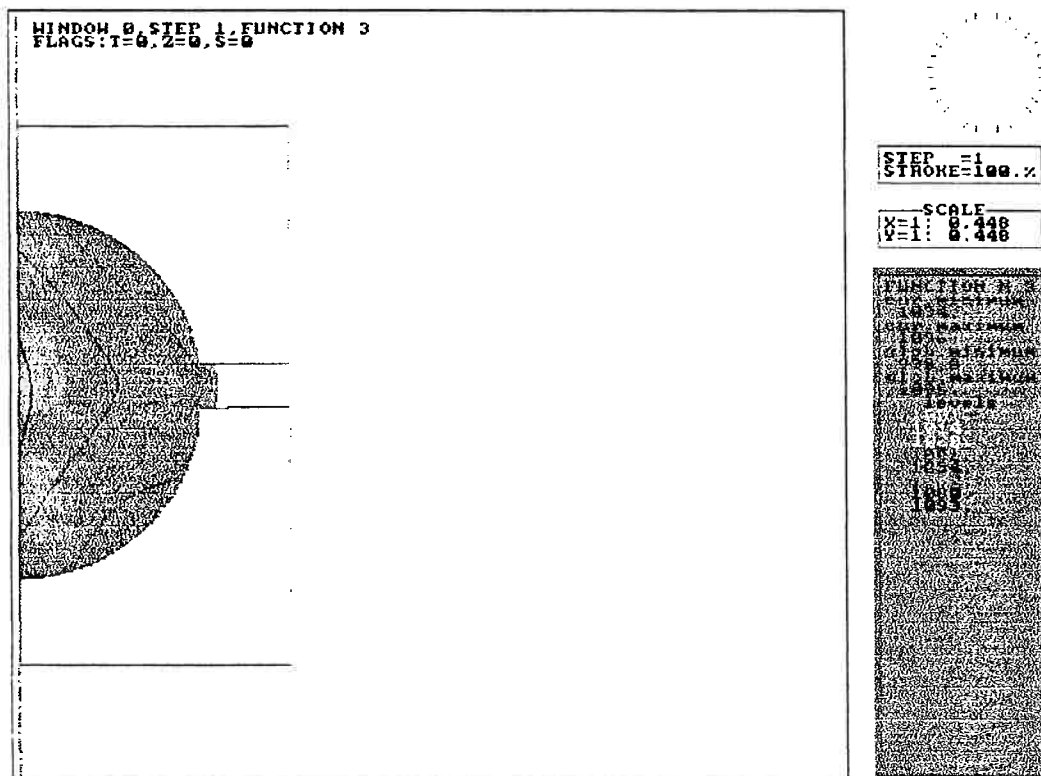


EQUIPMENT	
Hammer	Name: DG28H (90°)
TOOL1	
Lubricant:	POLAND
Temperature:	400.00
TOOL2	
Lubricant:	POLAND
Temperature:	400.00
WORKPIECE	
Material:	20
Temperature:	1100.00
Cooling:	2. 3. 3

Press any key to continue

Figura 17 - Parâmetros iniciais da simulação 5.3.1. ($\mu=0,5$)

18A

Figura 18 - Perfis de Temperatura para simulação 5.3.1 ($\mu=0,5$)

104

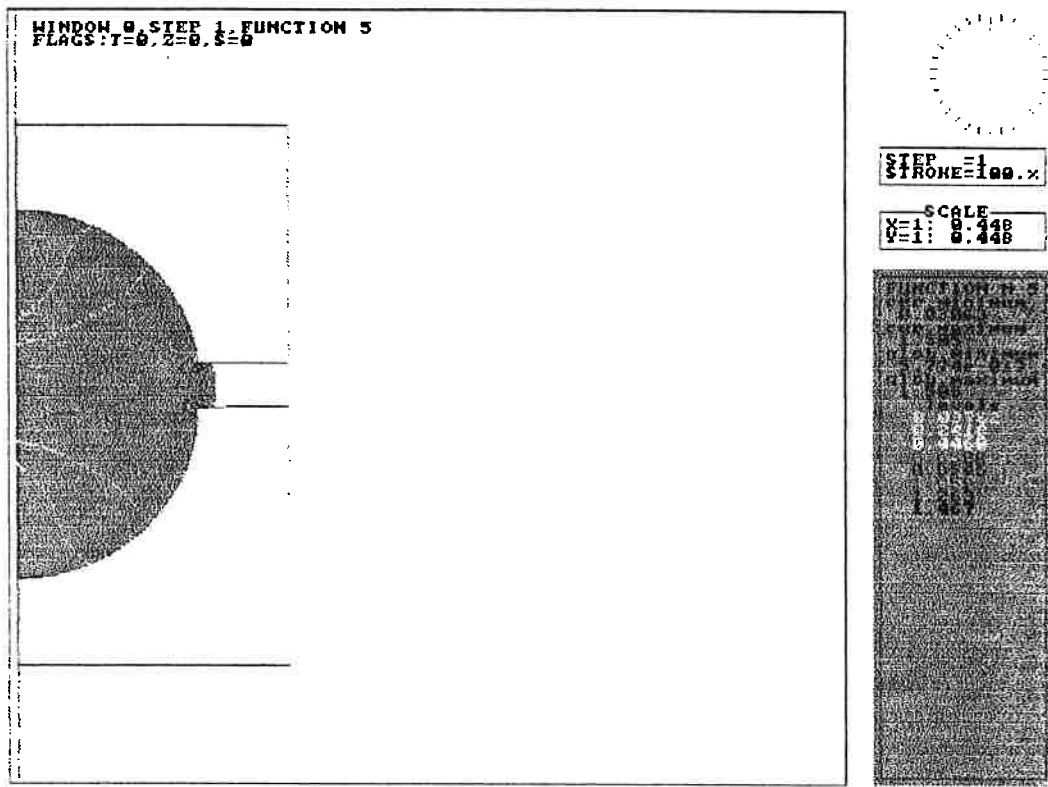


Figura 19 - Perfis de deformação para simulação 5.3.1. ($\mu=0,5$)

205

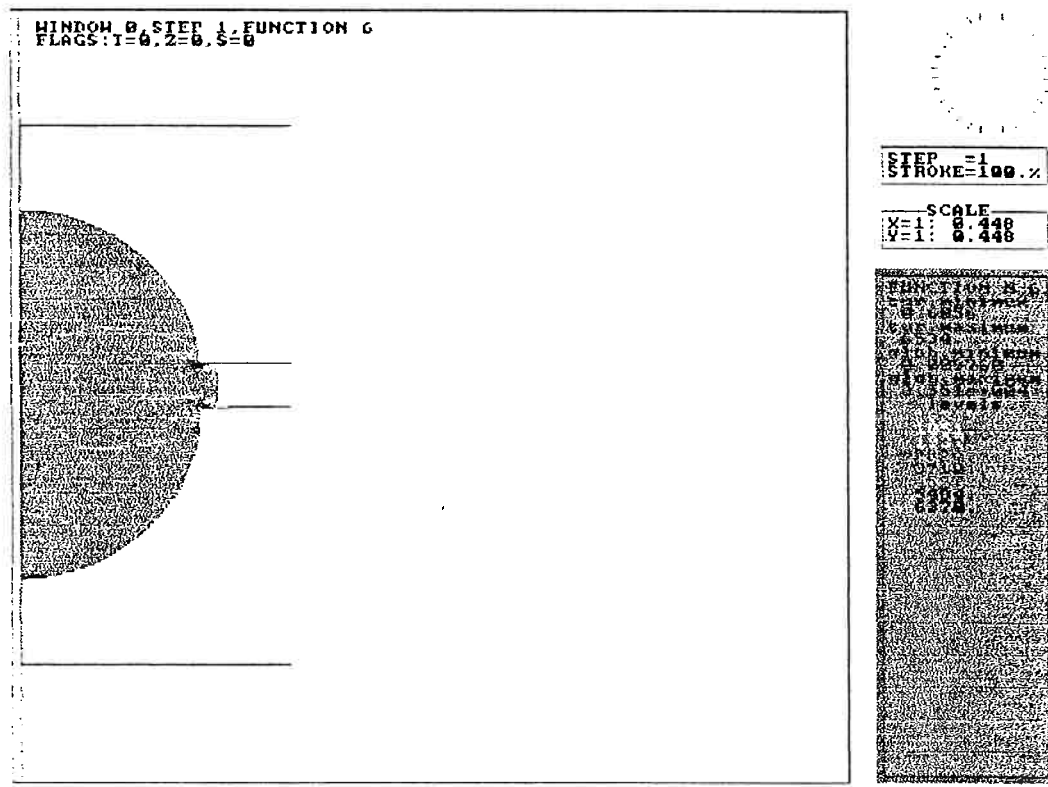


Figura 20 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.3.1. ($\mu=0,5$)

21A

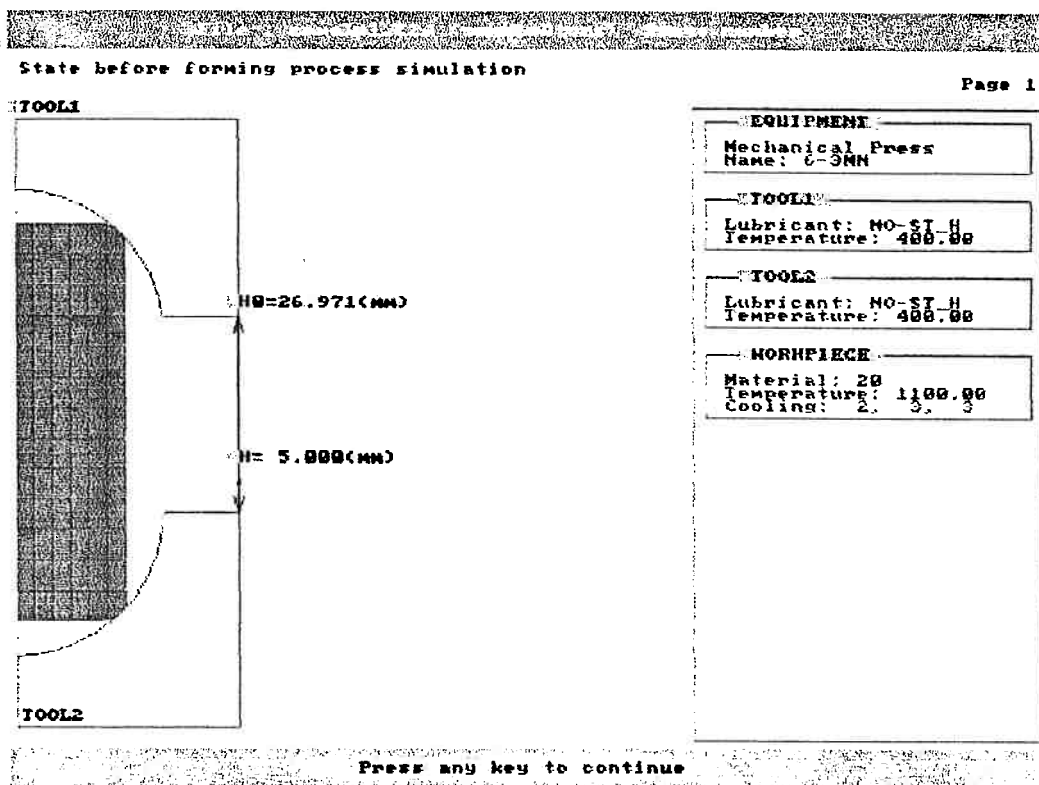


Figura 21 - Parâmetros iniciais da simulação 5.4.1. ($v=20$ m/s)

22A

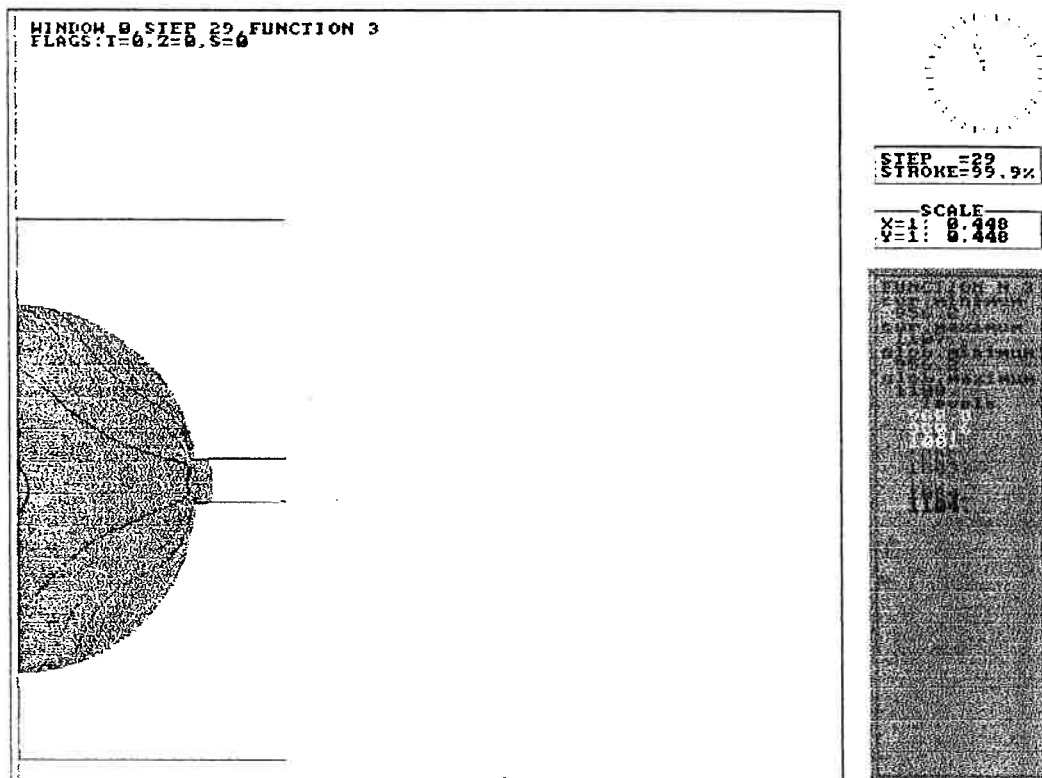


Figura 22 - Perfis de Temperatura para simulação 5.4.1. ($v=40$ m/s)

23

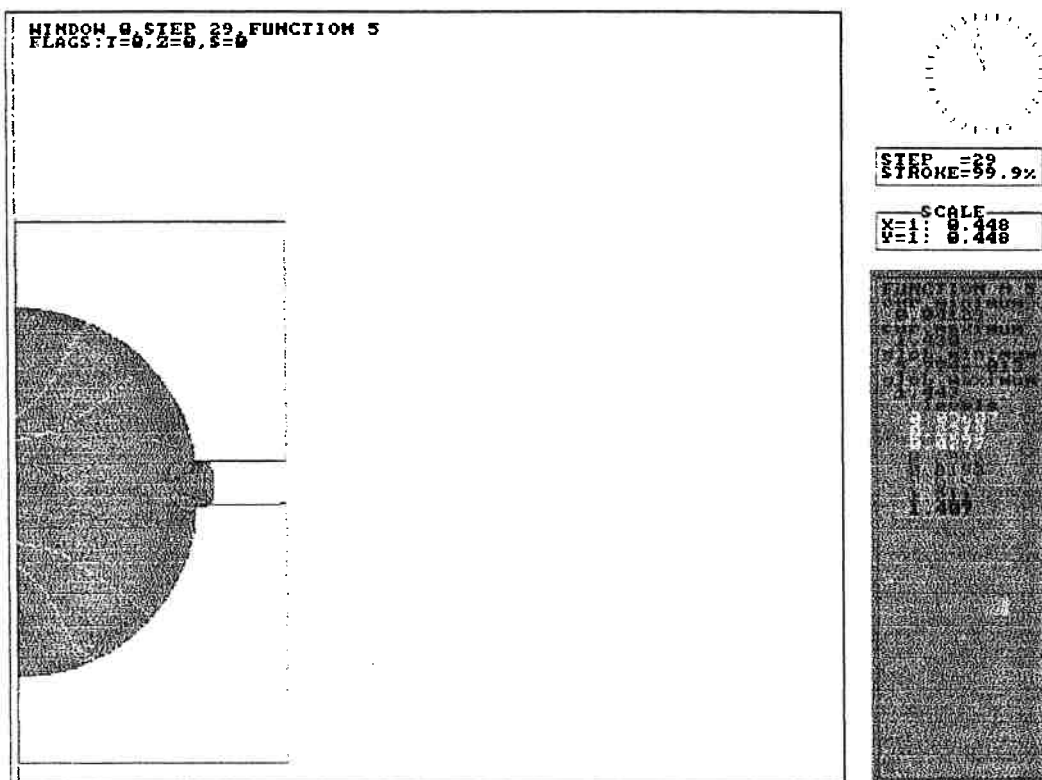


Figura 23 - Perfis de deformação para simulação 5.4.1. ($v=20\text{m/s}$)

24

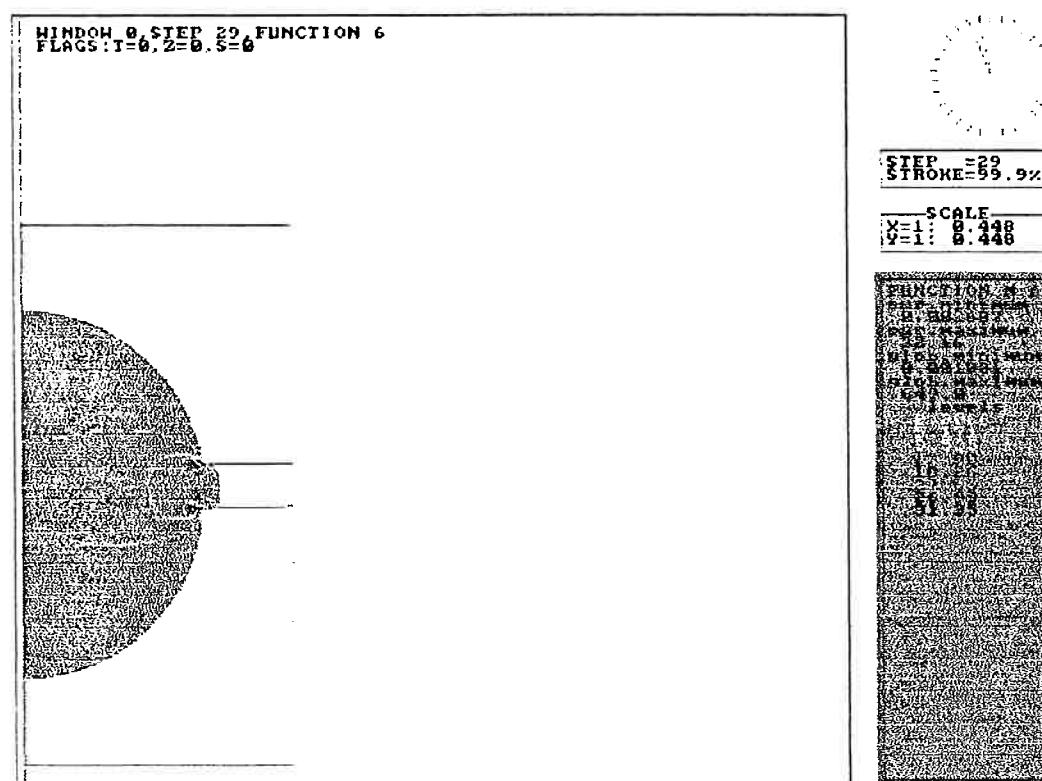


Figura 24 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.4.1 ($v=20\text{ m/s}$)

Page 1



21



13

3B

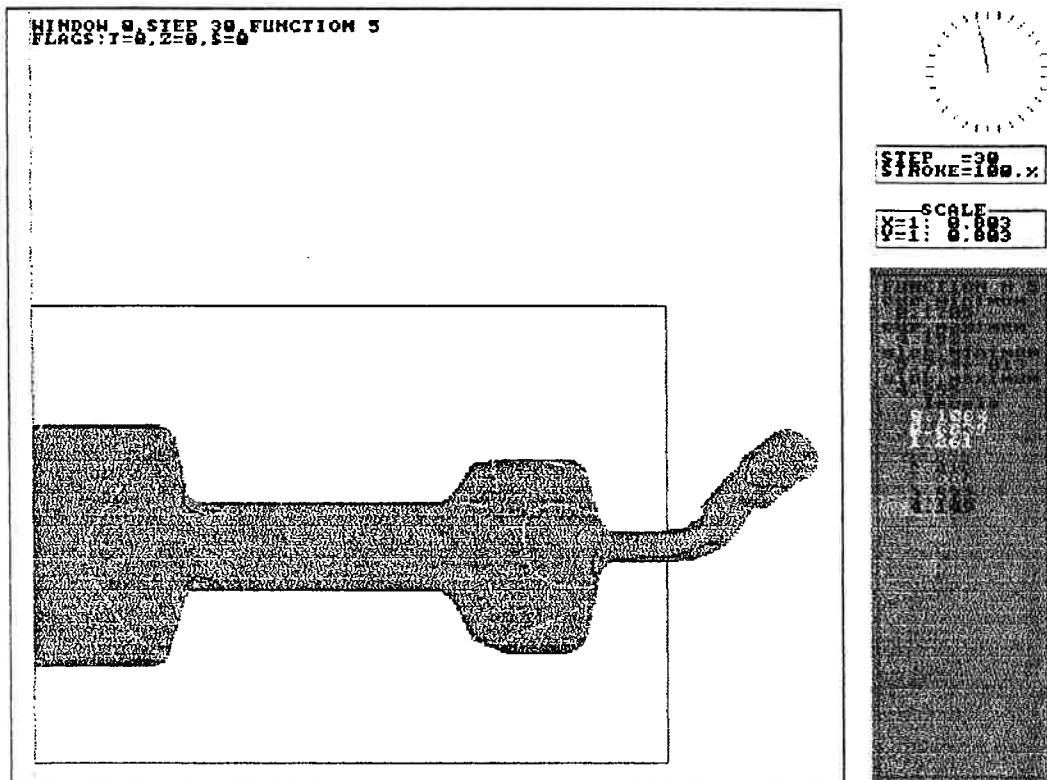


Figura 3 - Perfis de deformação para simulação 5.2.2. ($\alpha=1,3 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

4B

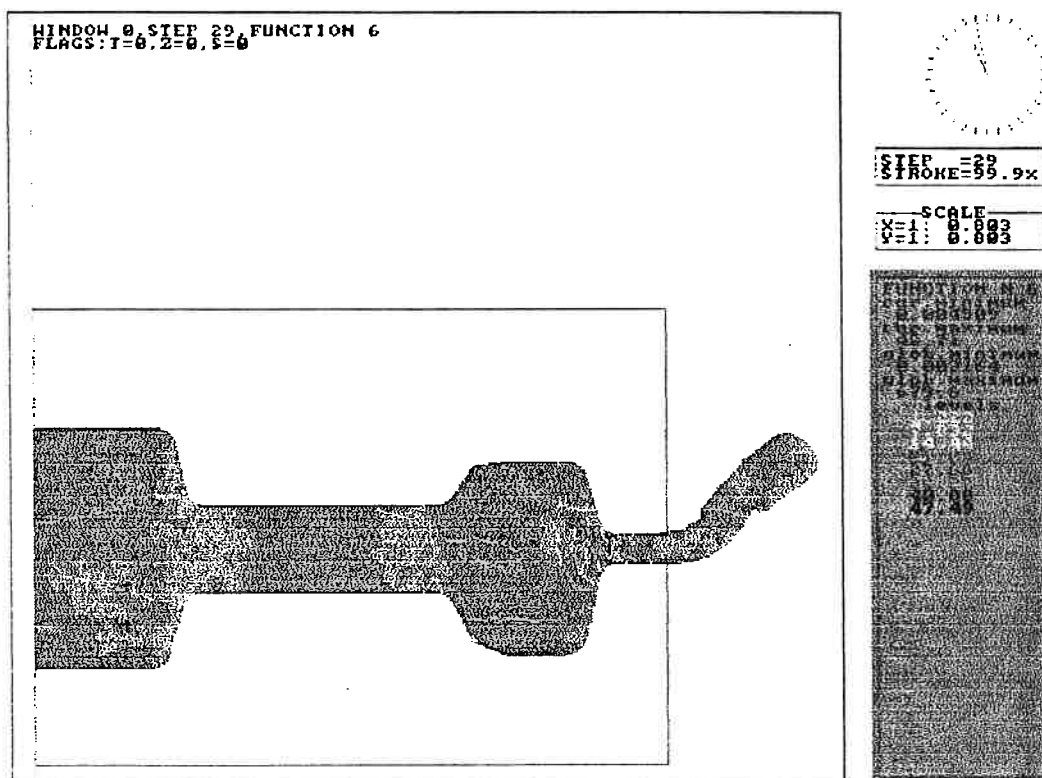
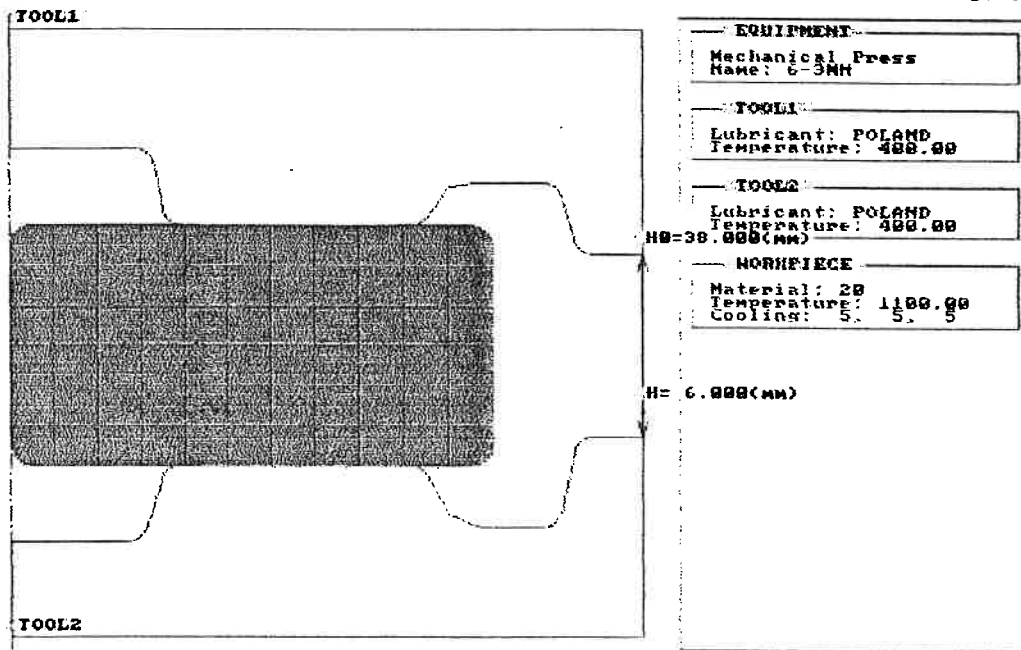


Figura 4 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.2.2. ($\alpha=1,3 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

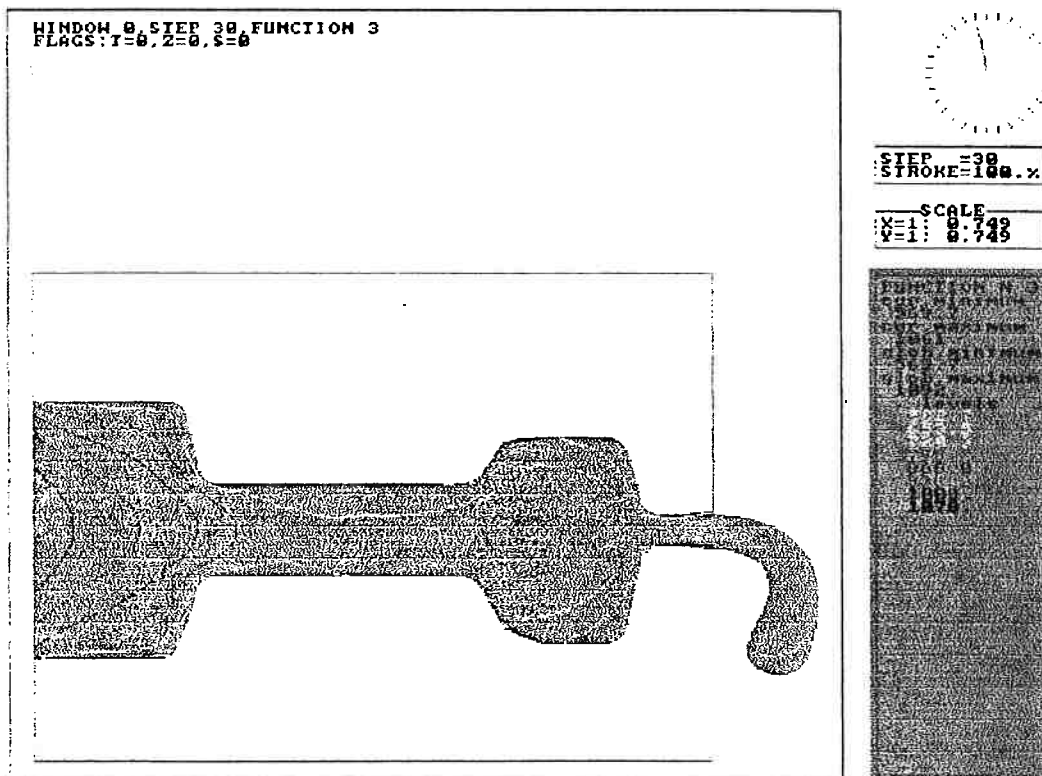
5B

State before forming process simulation

Page 1

Figura 5 - Parâmetros iniciais da simulação 5.2.2. ($\alpha=13,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

6B

Figura 6 - Perfis de Temperatura para simulação 5.2.2. ($\alpha=13,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

7B

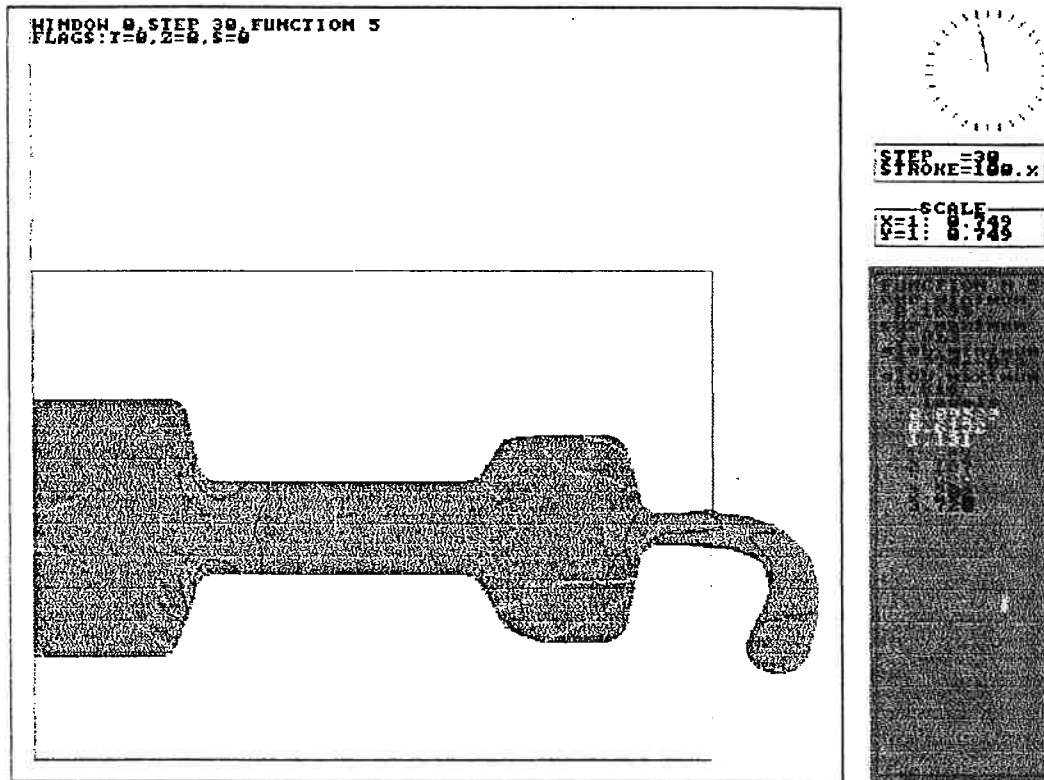


Figura 7 - Perfis de deformação para simulação 5.2.2. ($\alpha=13,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

8B

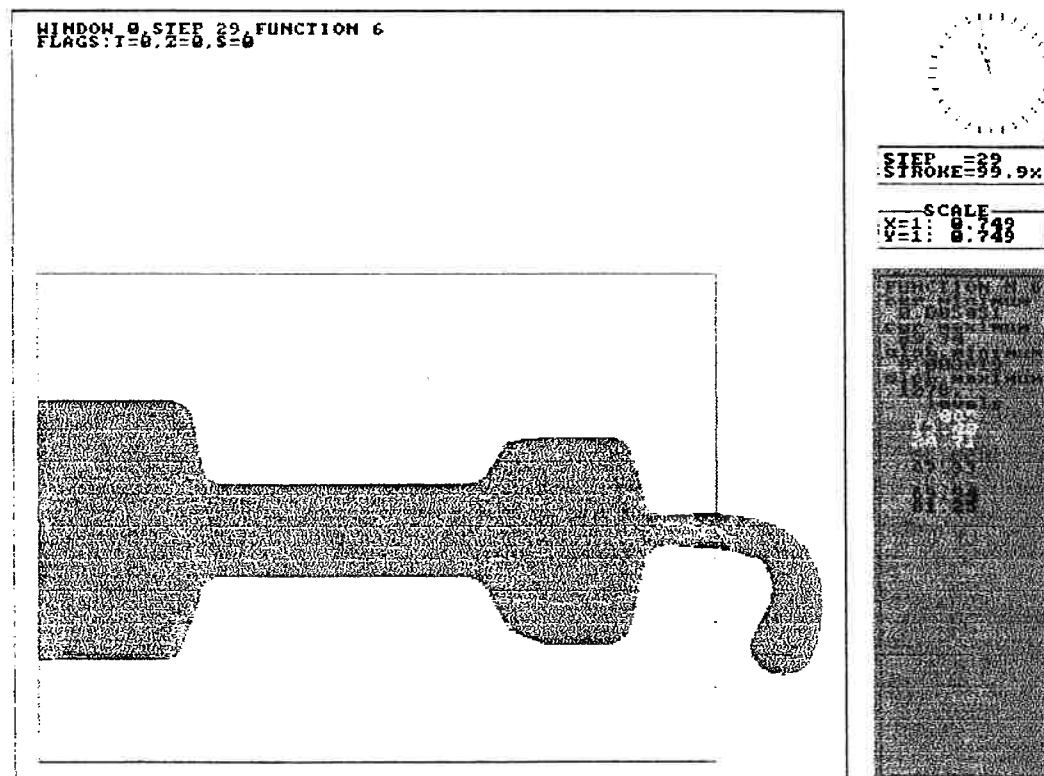


Figura 8 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.2.2. ($\alpha=13,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

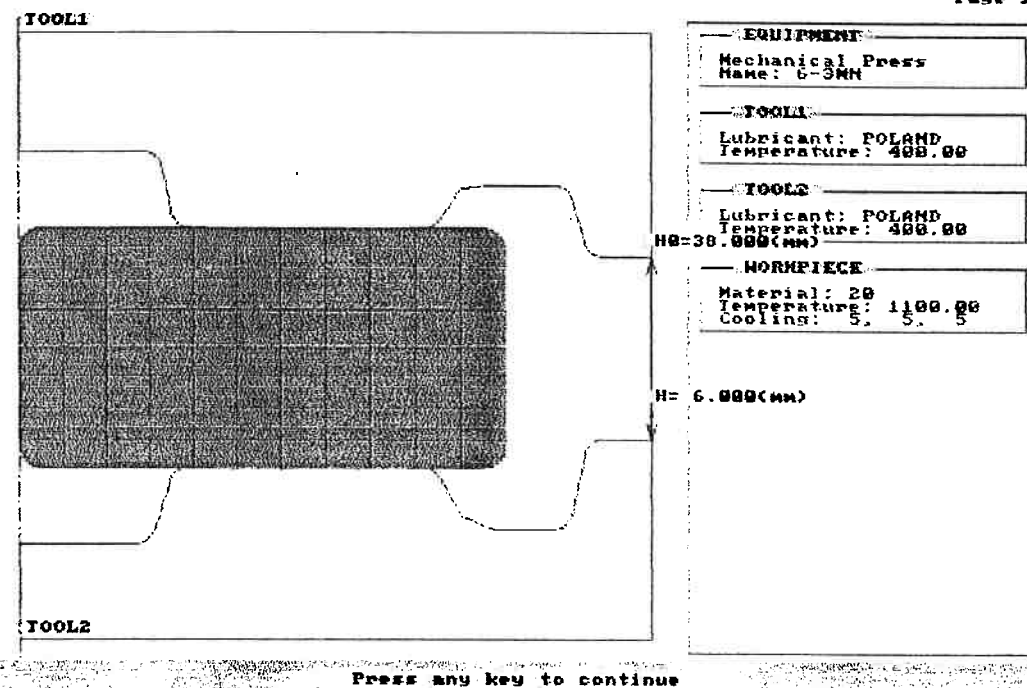


Figura 9 - Parâmetros iniciais da simulação 5.2.2. ($\alpha=130,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

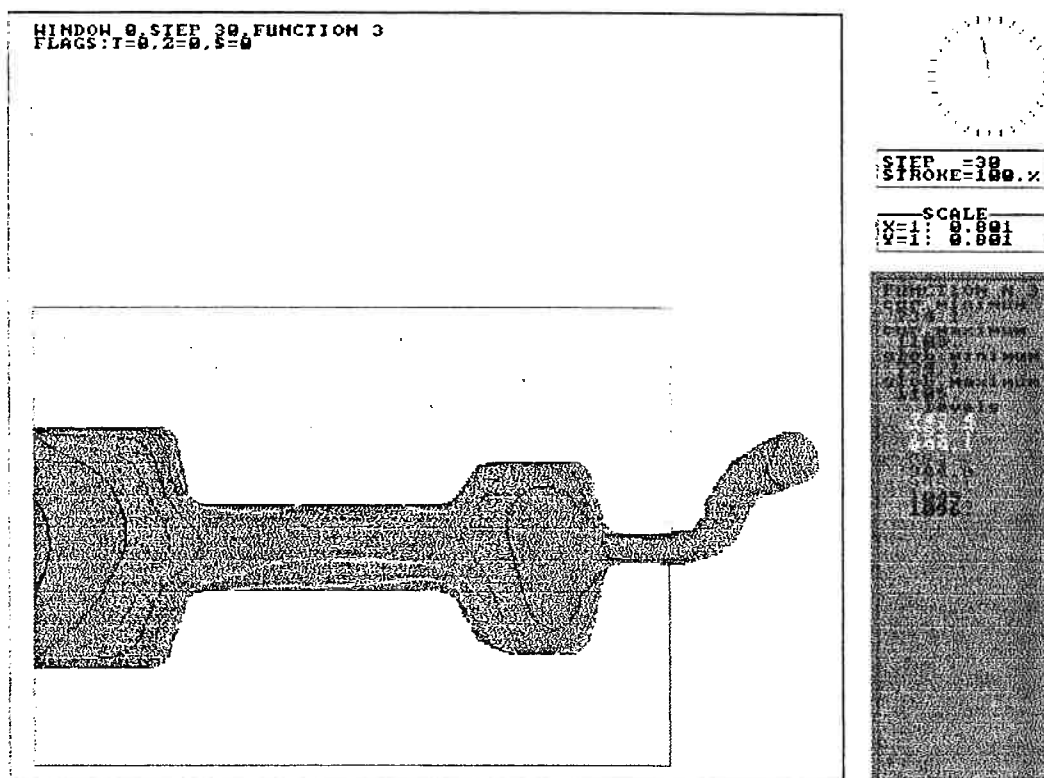


Figura 10 - Perfis de Temperatura para simulação 5.2.2. ($\alpha=130,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

11B

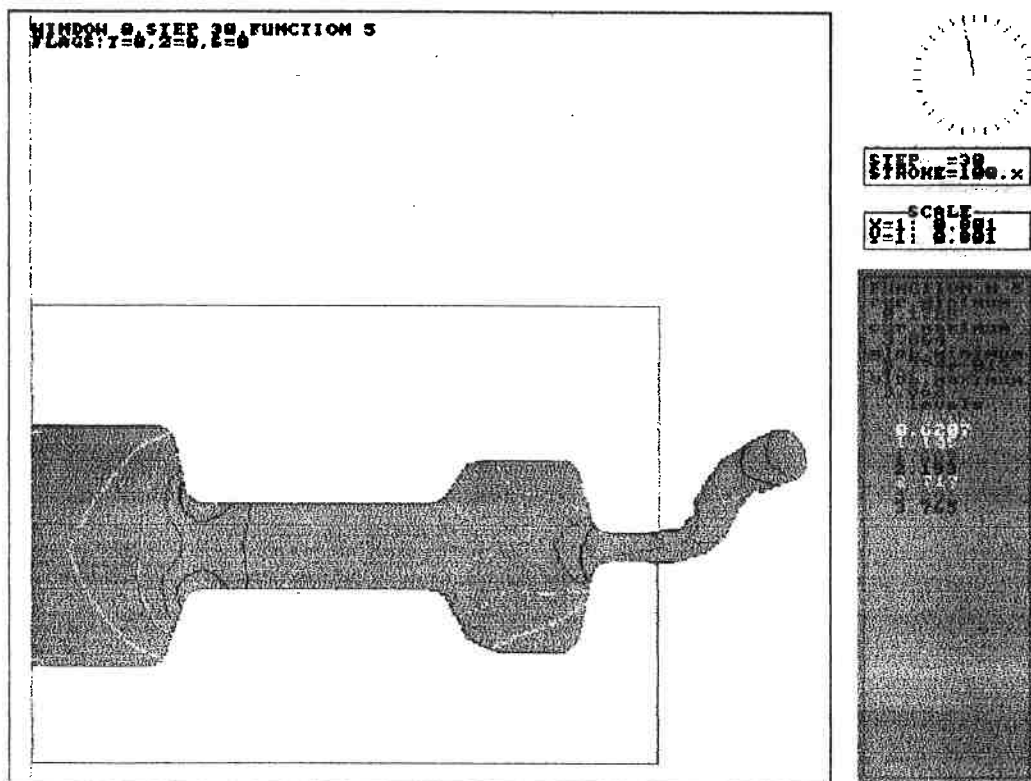


Figura 11 - Perfis de deformação para simulação 5.2.2. ($\alpha=130,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

12B

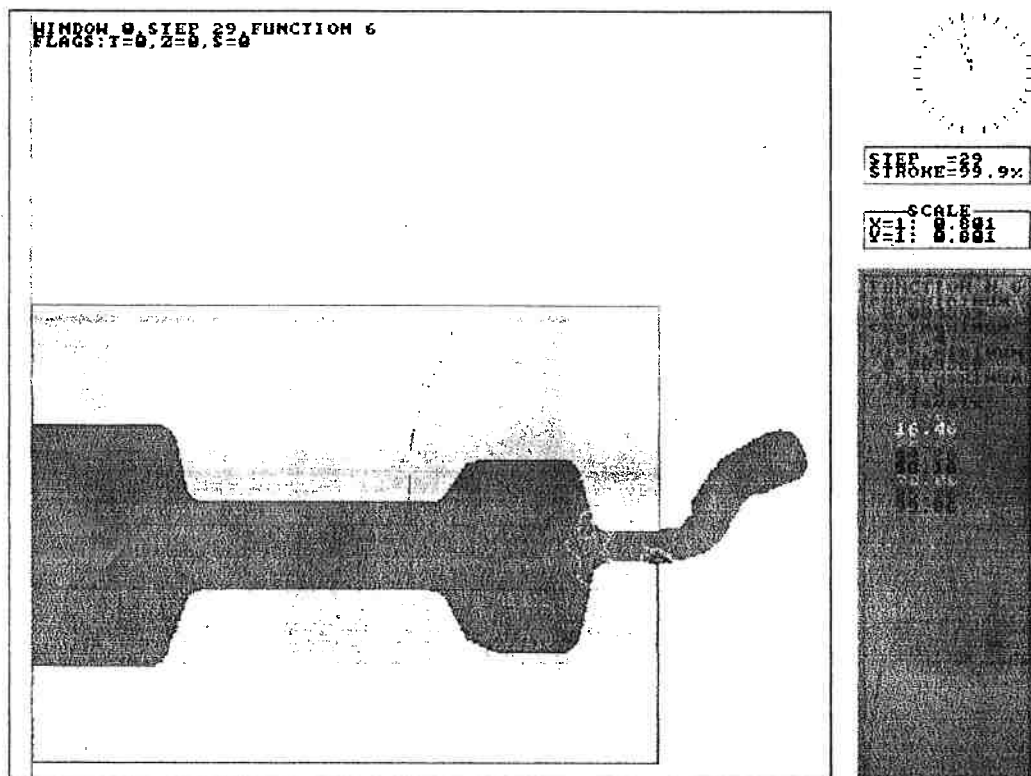


Figura 12 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.2.2. ($\alpha=130,0 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

15B

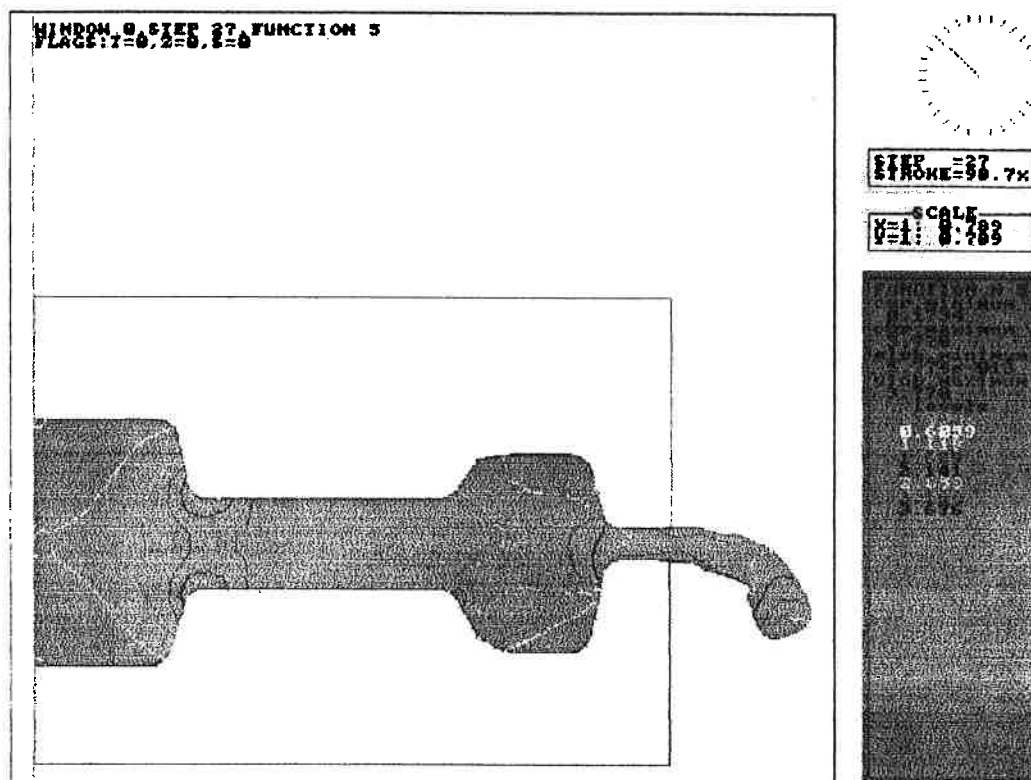


Figura 15 - Perfis de deformação para simulação 5.2.2. ($\alpha=1300 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

16B

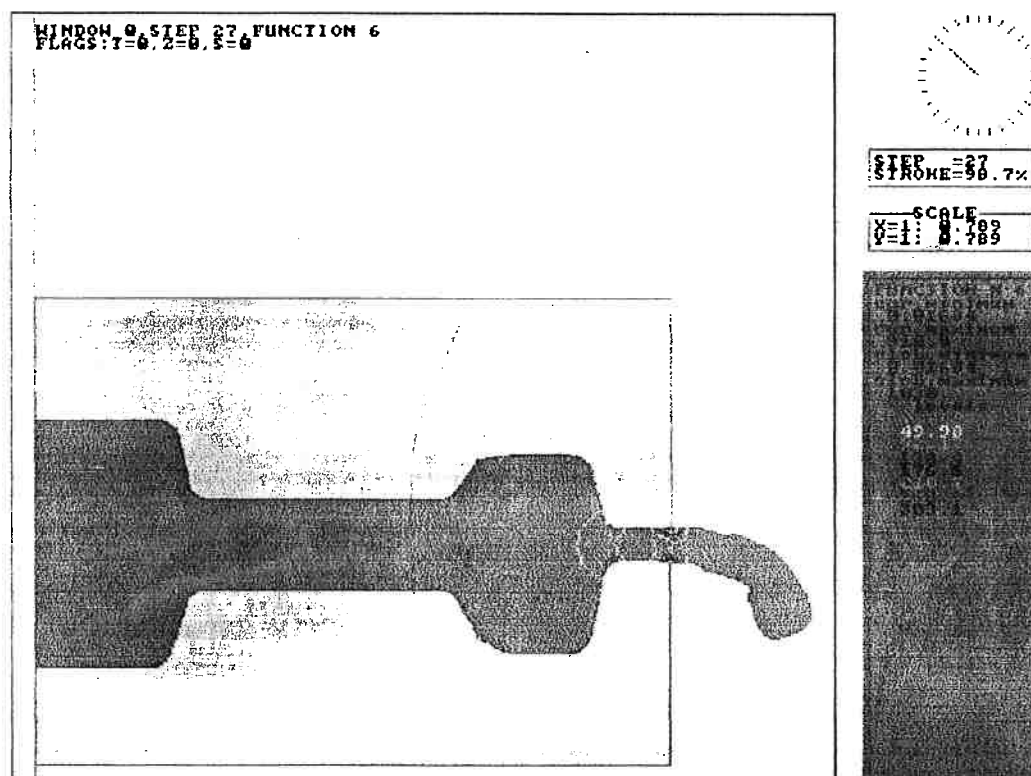


Figura 16 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.2.2. ($\alpha=1300 \text{ kW/m}^2\text{K}$)

17B

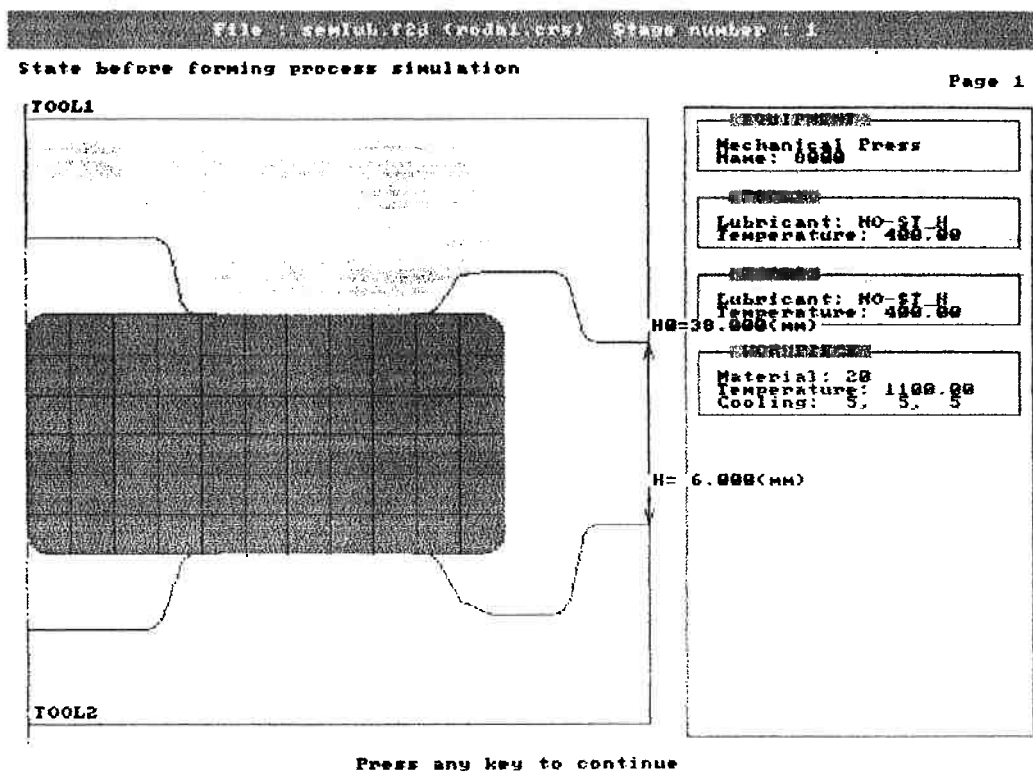


Figura 17 - Parâmetros iniciais da simulação 5.3.2. ($\mu=0,5$)

18B

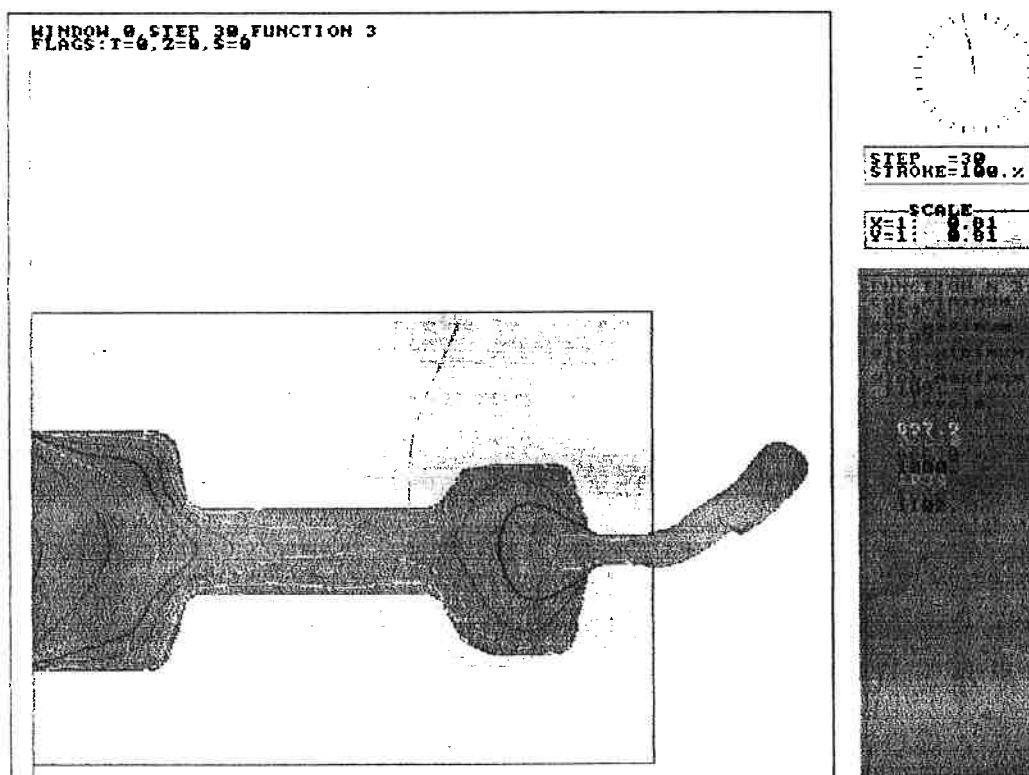


Figura 18 - Perfis de Temperatura para simulação 5.3.2. ($\mu=0,5$)

19B

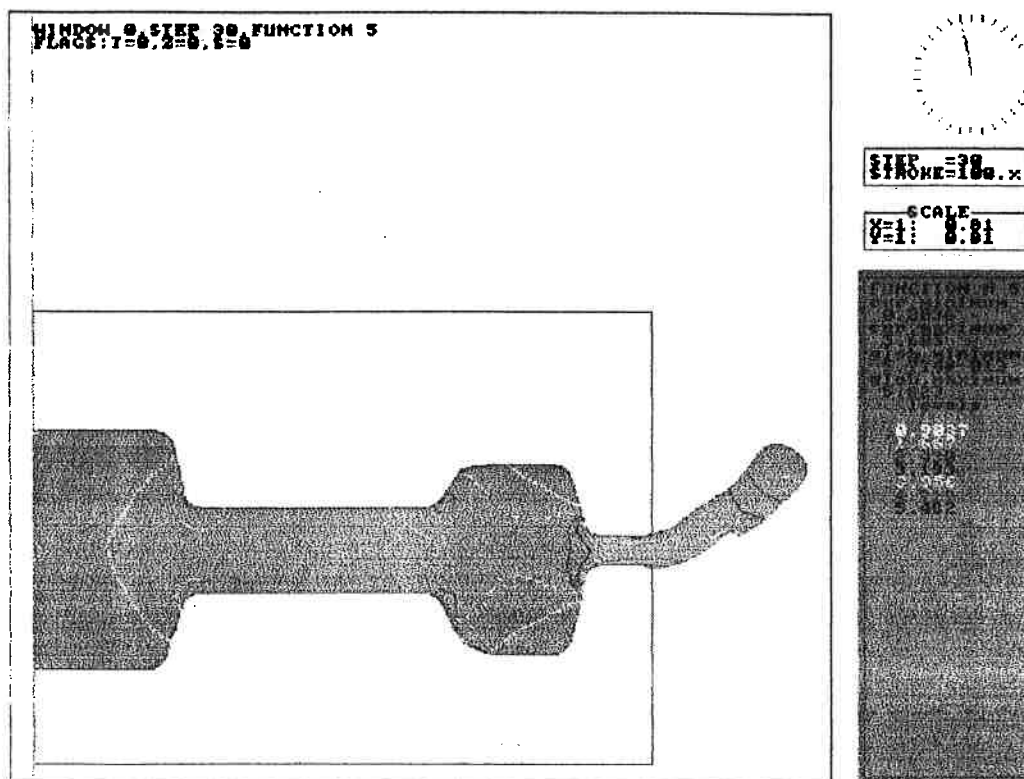


Figura 19 - Perfis de deformação para simulação 5.3.2. ($\mu=0,5$)

20B

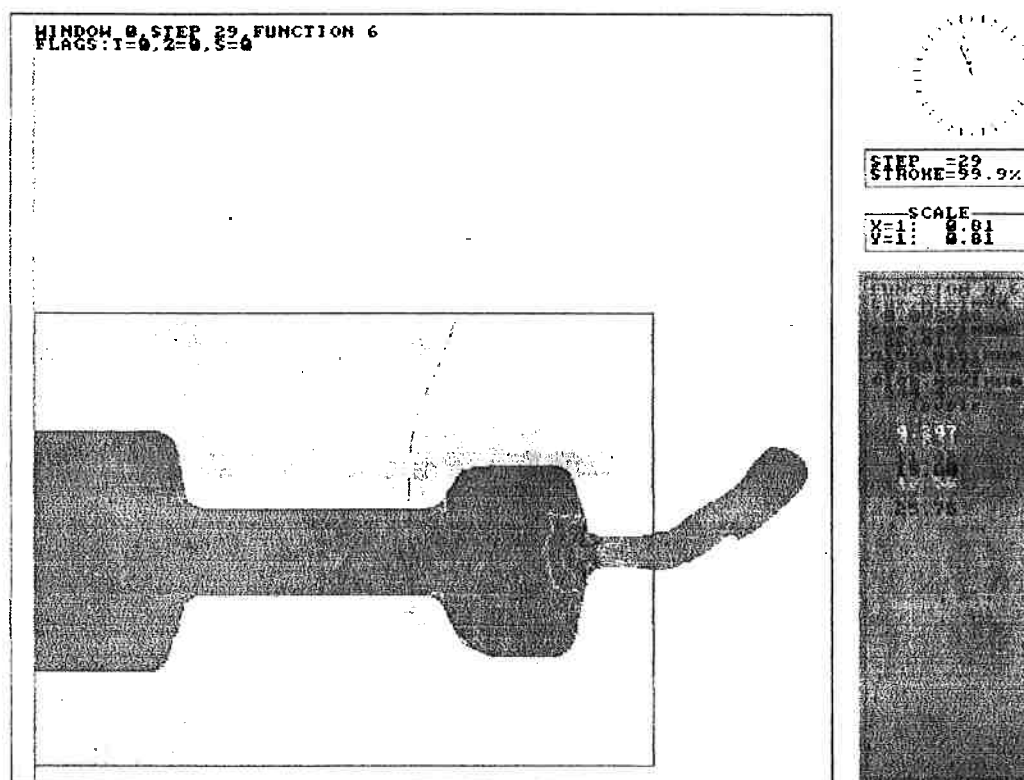


Figura 20 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.3.1 ($\mu=0,5$)

22B

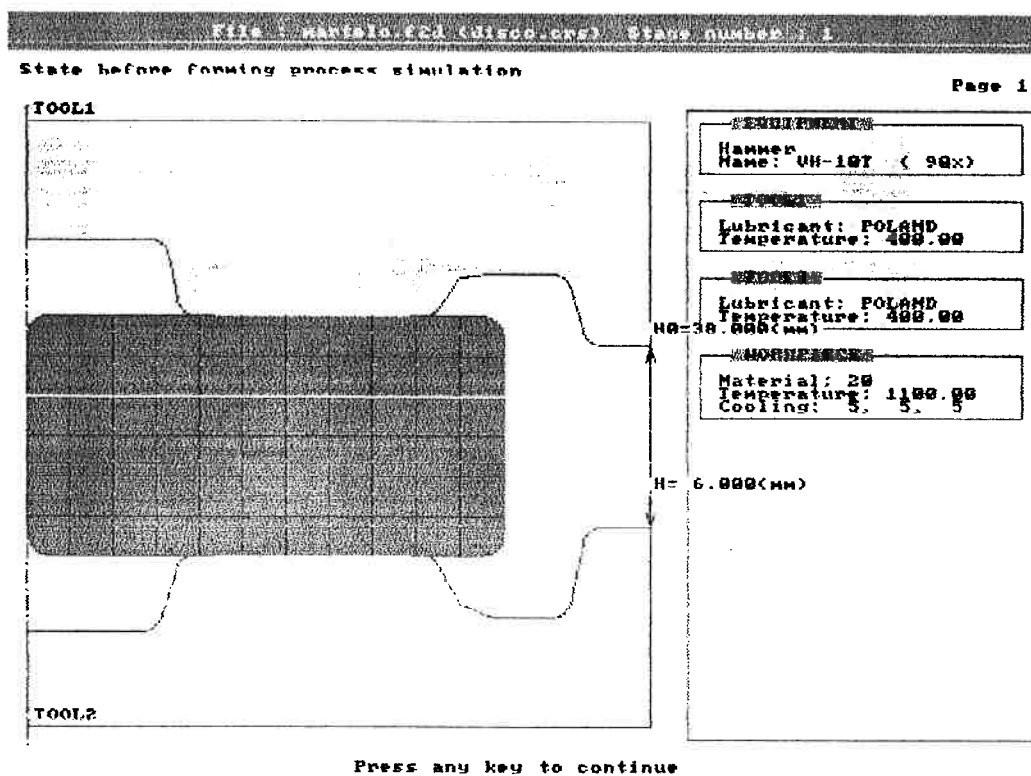


Figura 21 - Parâmetros iniciais da simulação 5.4.2. ($v=20$ m/s)

22B

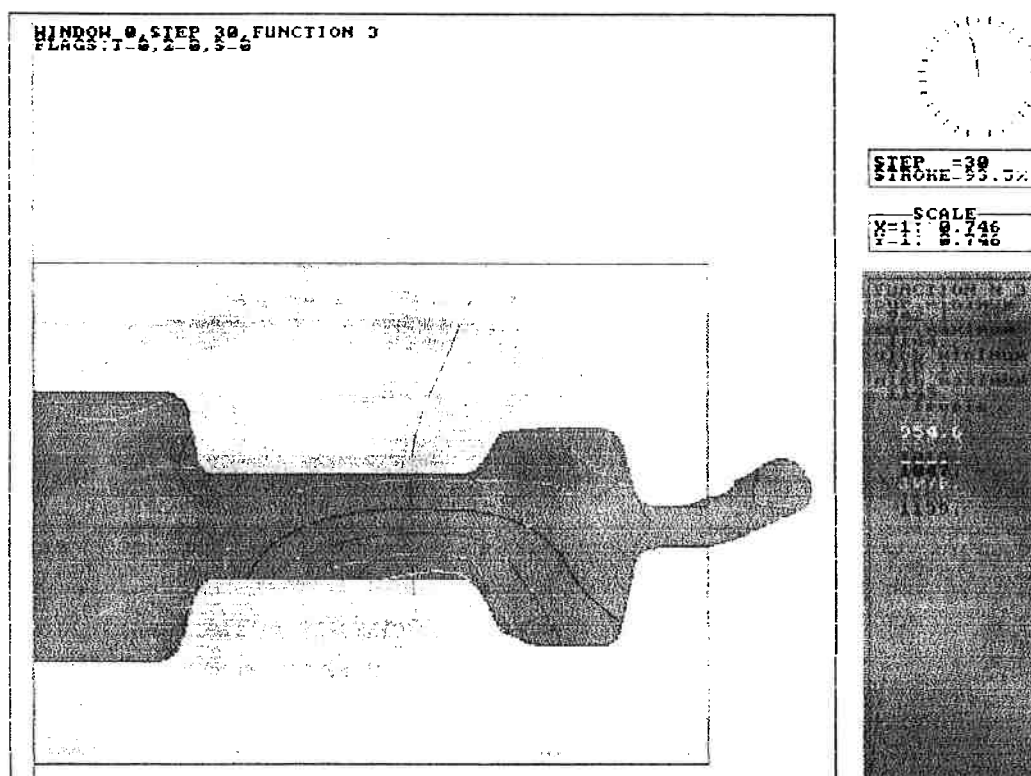


Figura 22 - Perfis de Temperatura para simulação 5.4.2. ($v=20$ m/s)

23 B

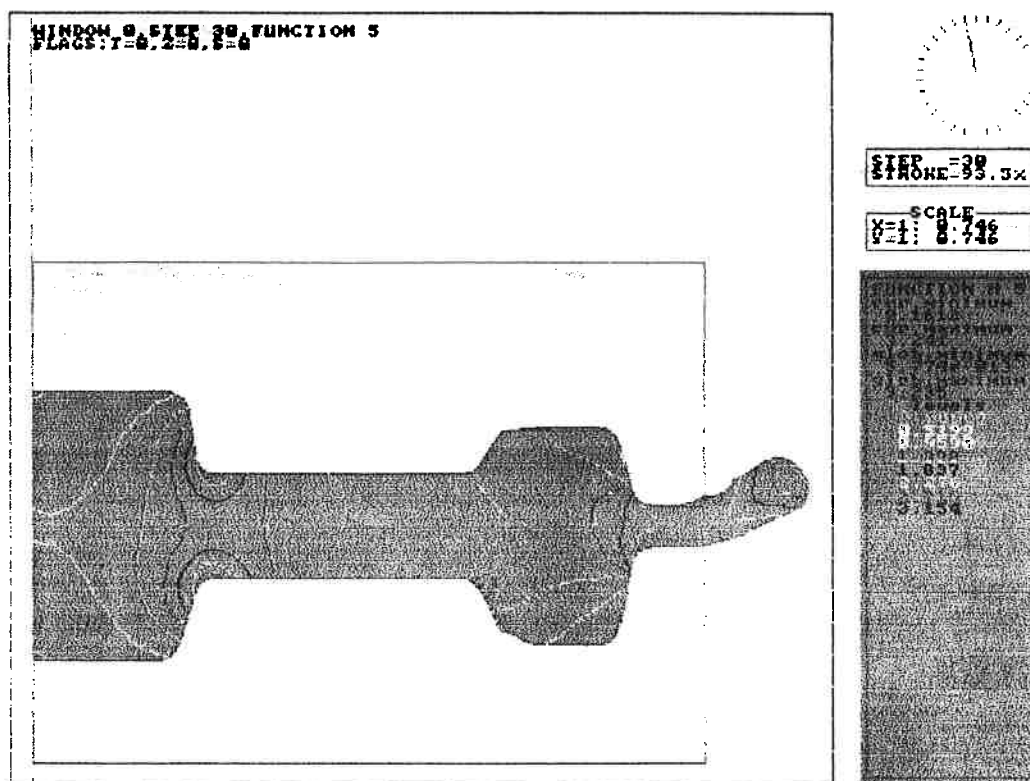


Figura 23 - Perfis de deformação para simulação 5.4.2. ($v=20$ m/s)

24 B

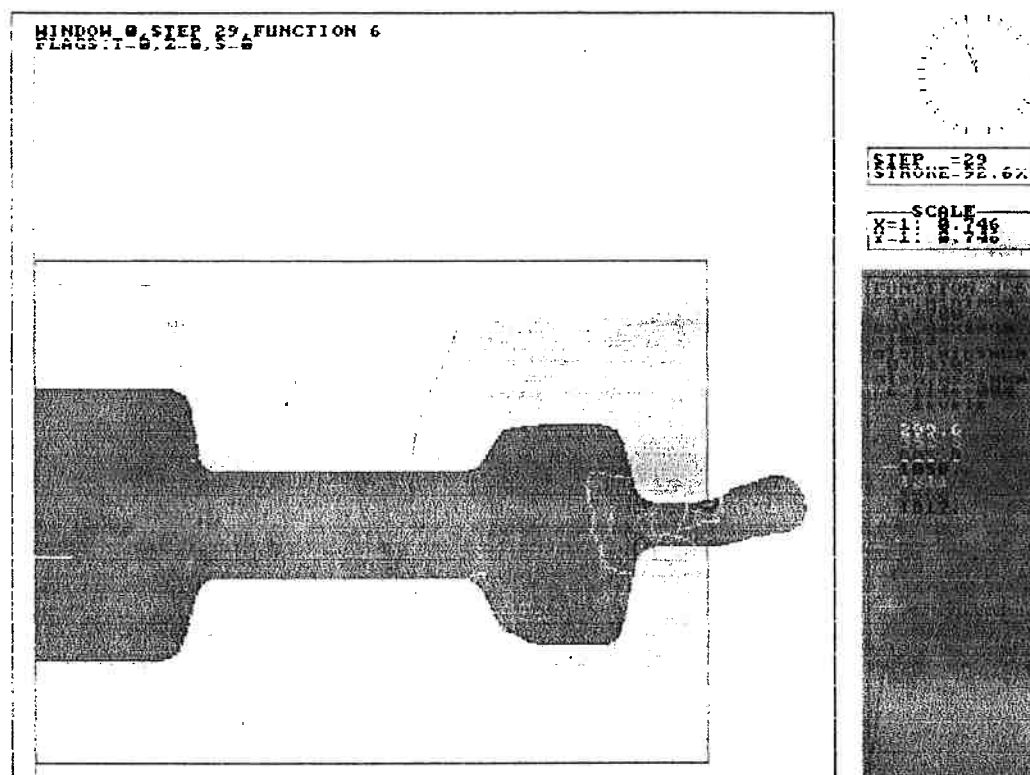


Figura 24 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.4.2. ($v=20$ m/s)

SC

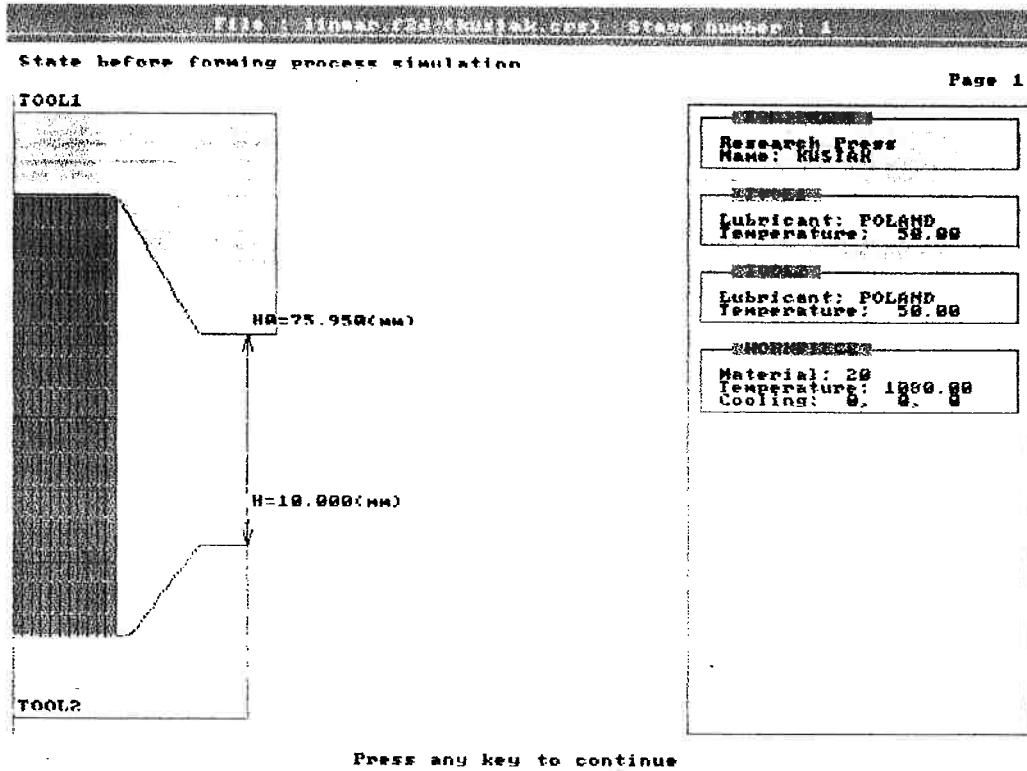


Figura 1 - Parâmetros iniciais da simulação 5.5.1. Linear

SC

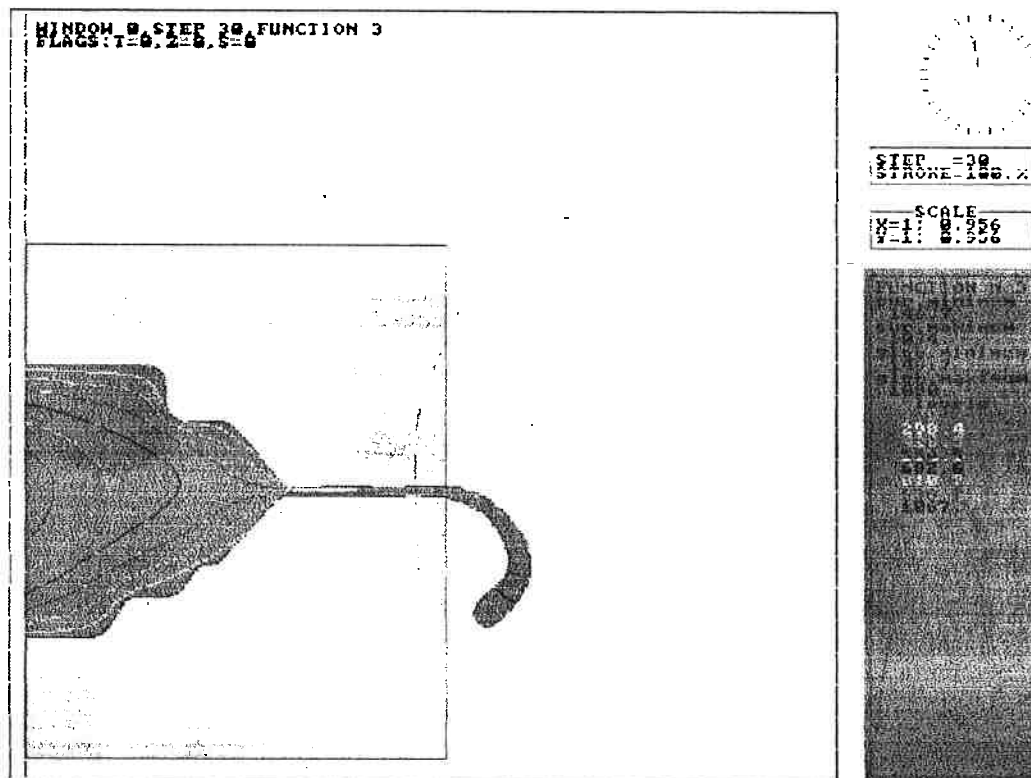


Figura 2 - Perfis de Temperatura para simulação 5.5.1.

3C

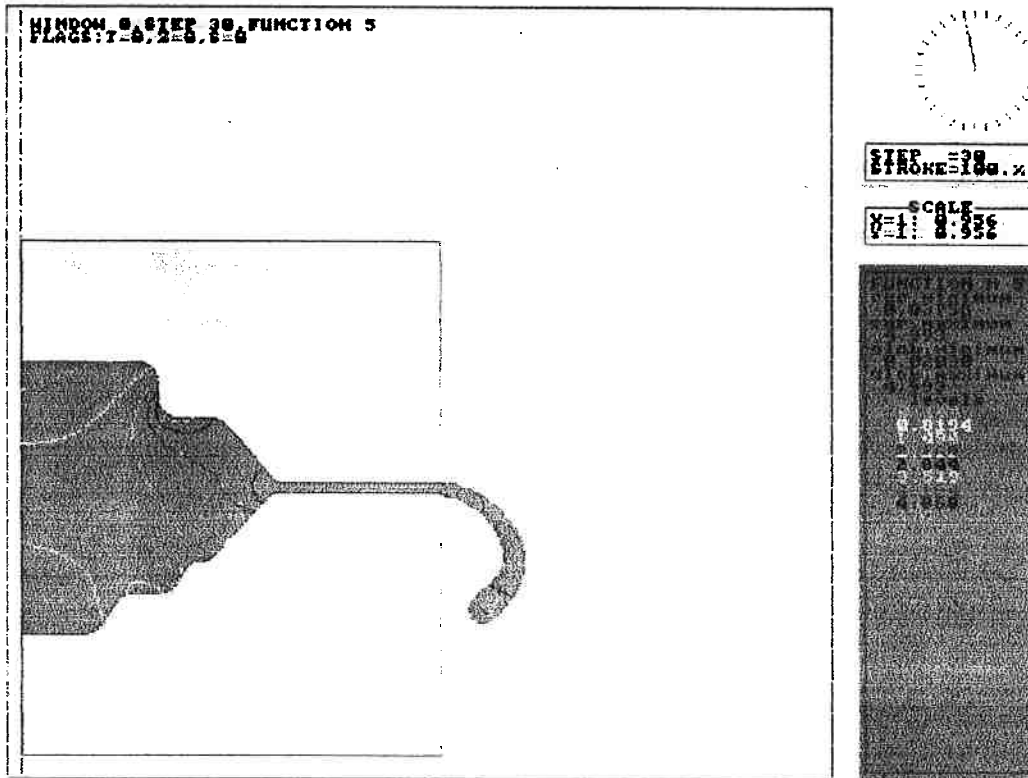


Figura 3 - Perfis de deformação para simulação 5.5.1.

4C

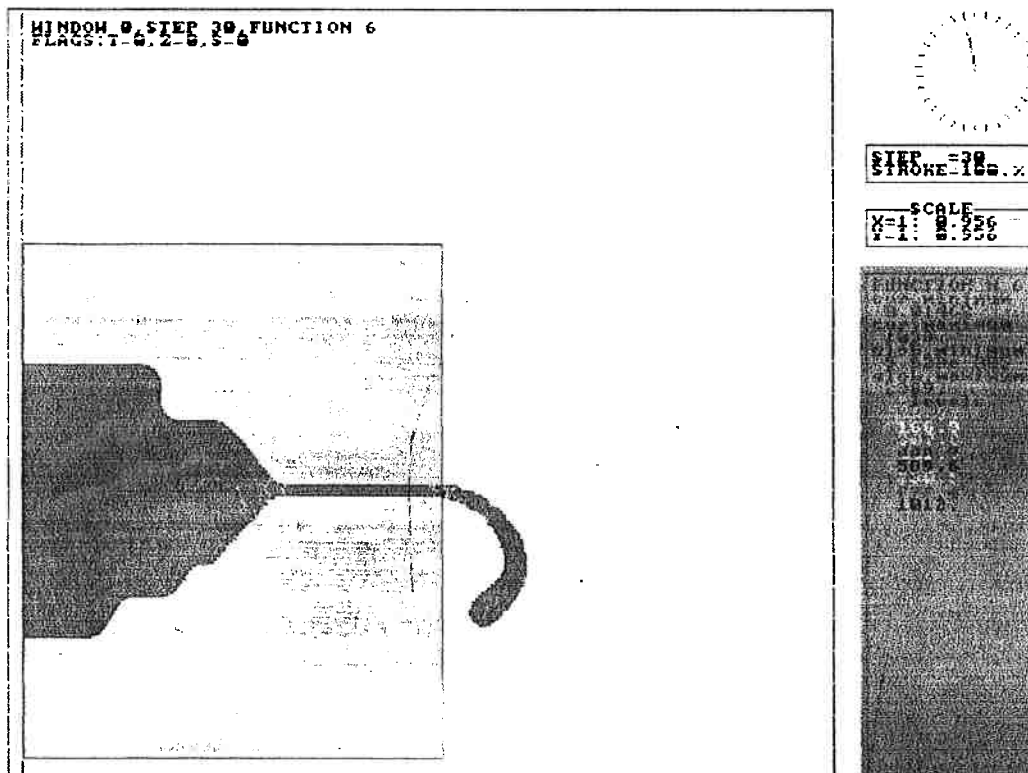


Figura 4 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.5.1.

7C

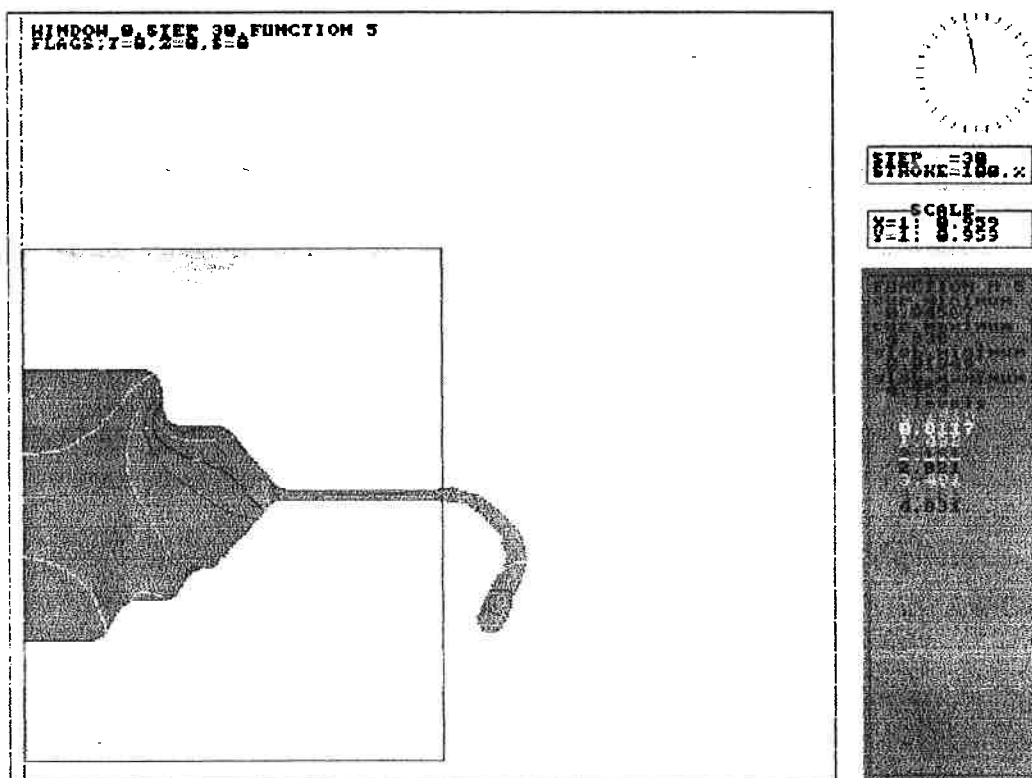


Figura 7 - Perfis de deformação para simulação 5.5.3.

8C

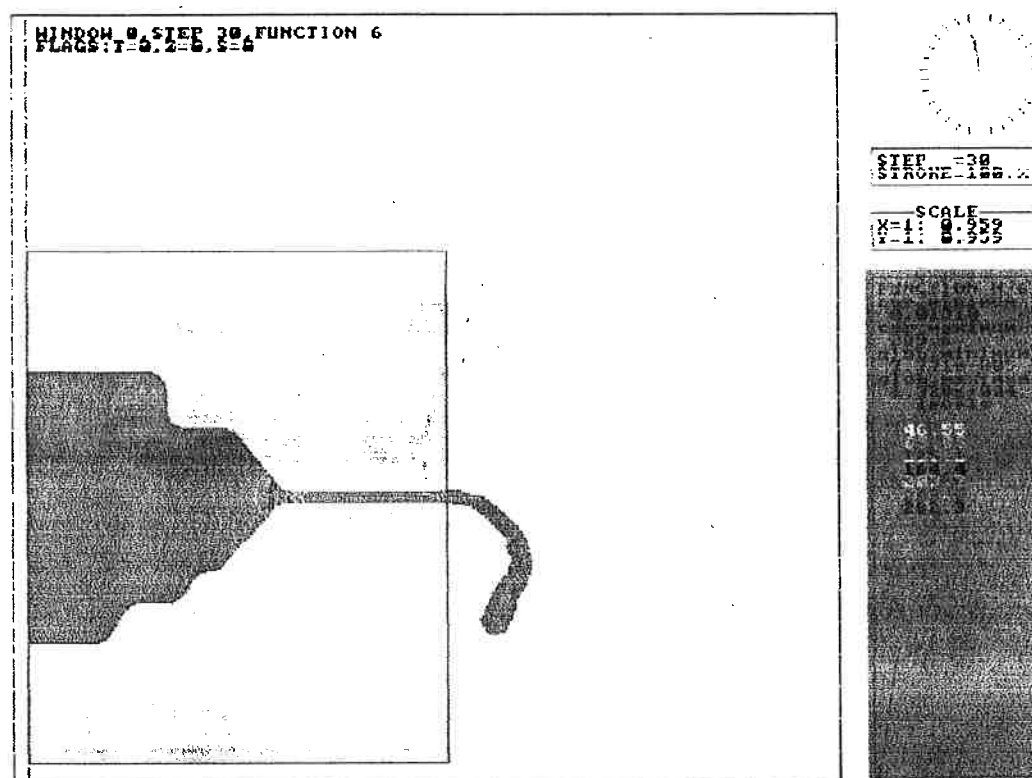


Figura 8 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.2.3.

9C

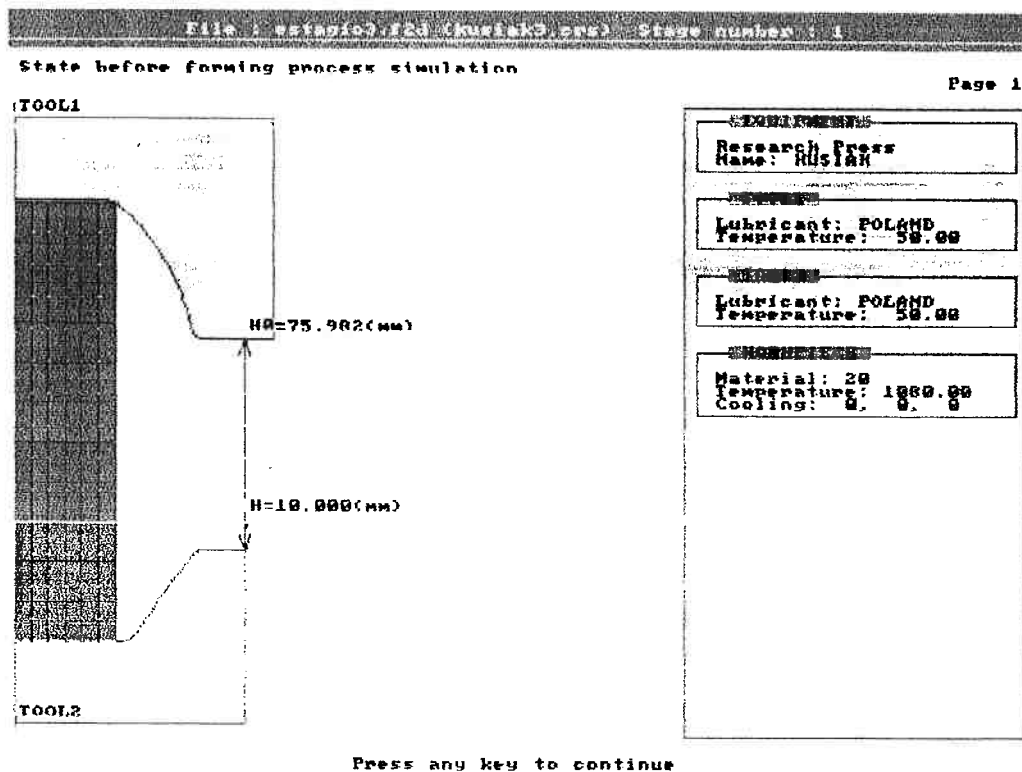


Figura 9 - Parâmetros iniciais da simulação 5.5.2. Convexa

10C

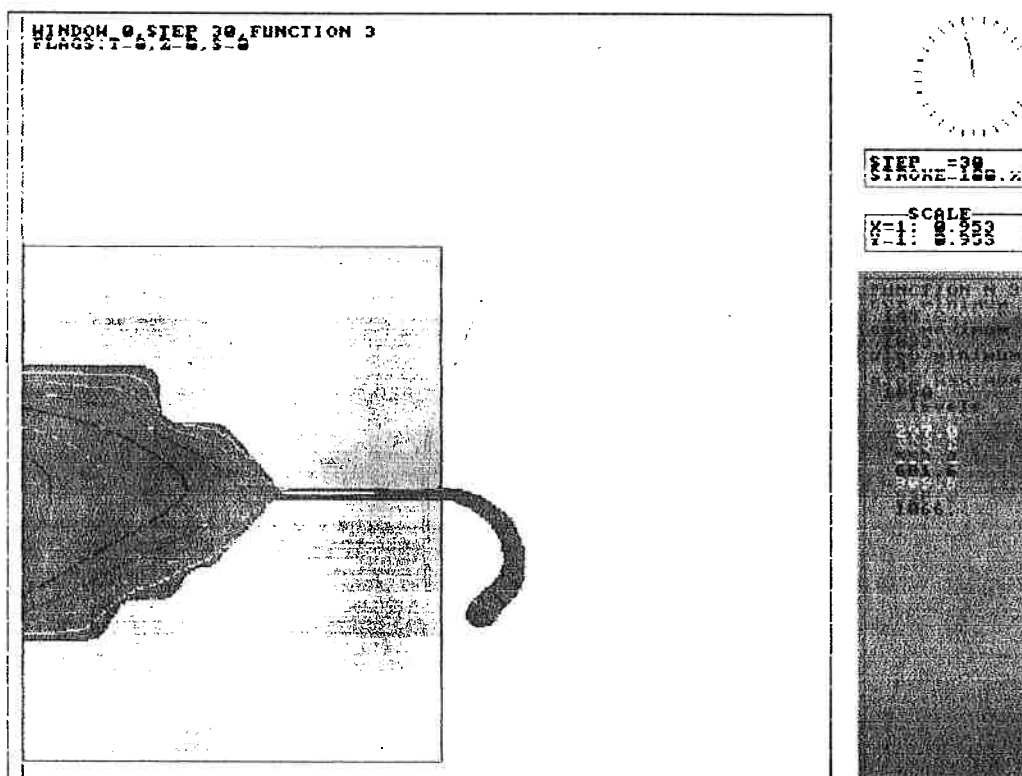


Figura 10 - Perfis de Temperatura para simulação 5.5.2.

11C

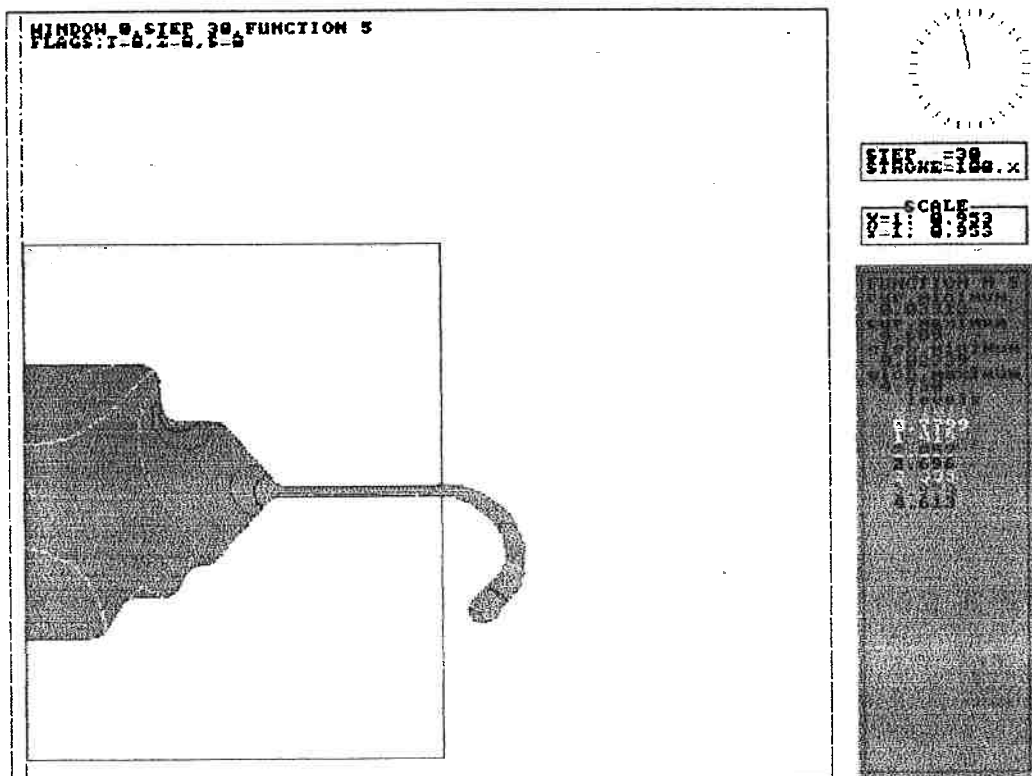


Figura 11 - Perfis de deformação para simulação 5.5.2.

12C

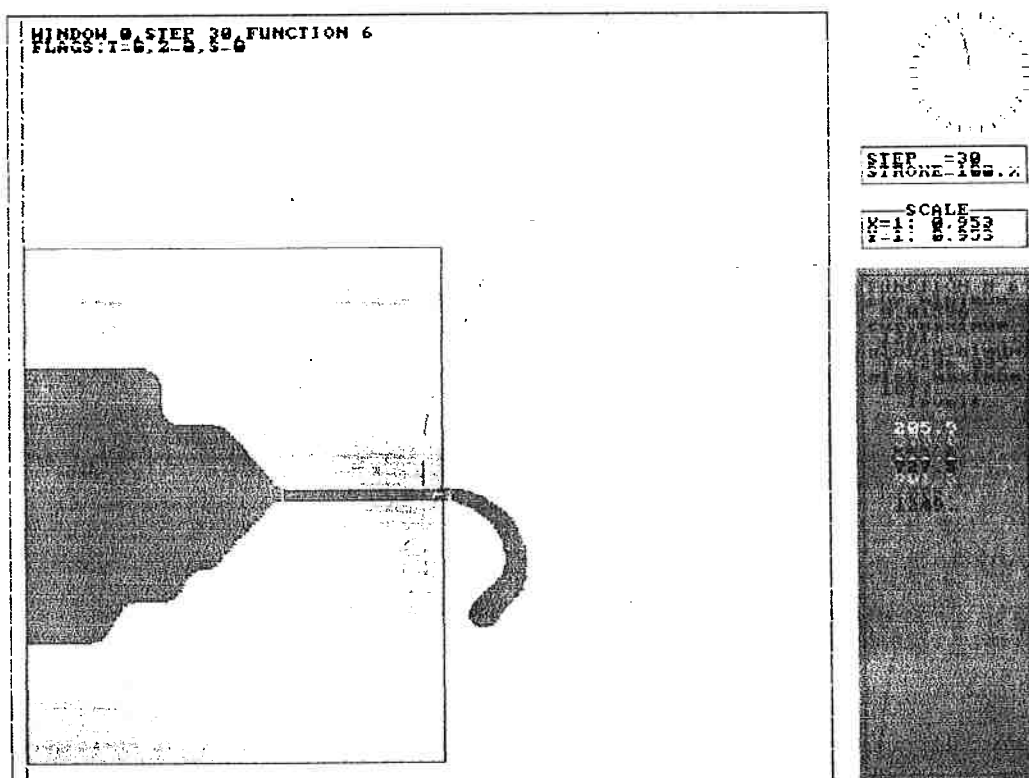


Figura 12 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.5.2.

13C

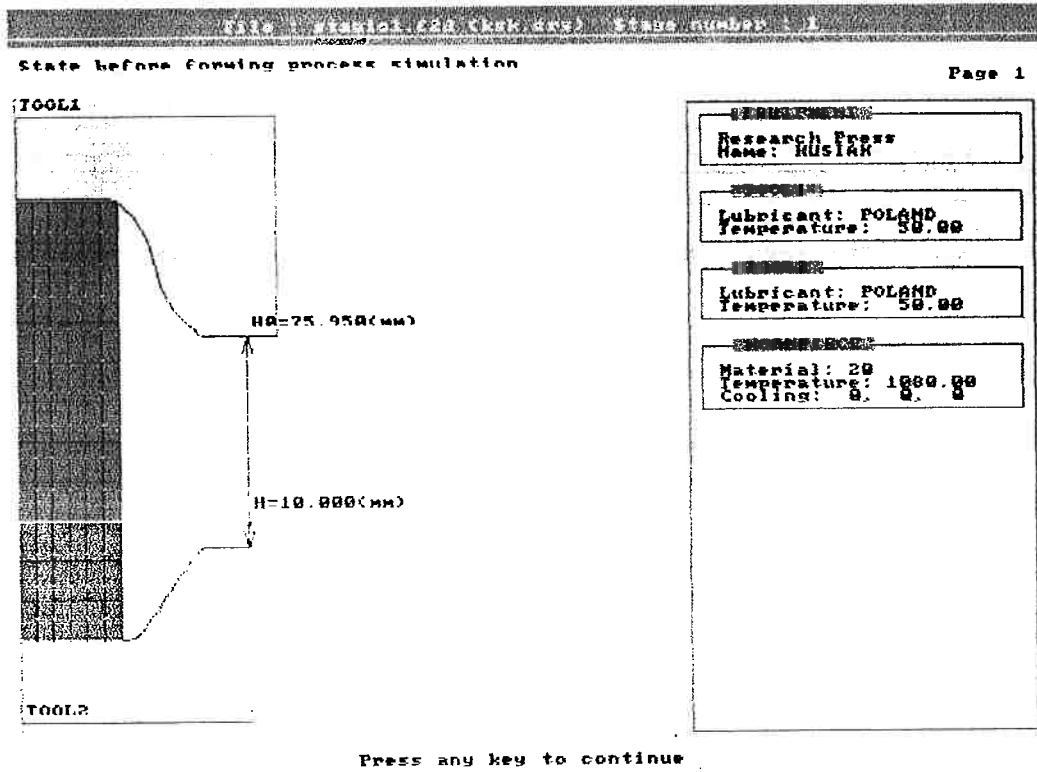


Figura 13 - Parâmetros iniciais da simulação 5.5.4.

14C

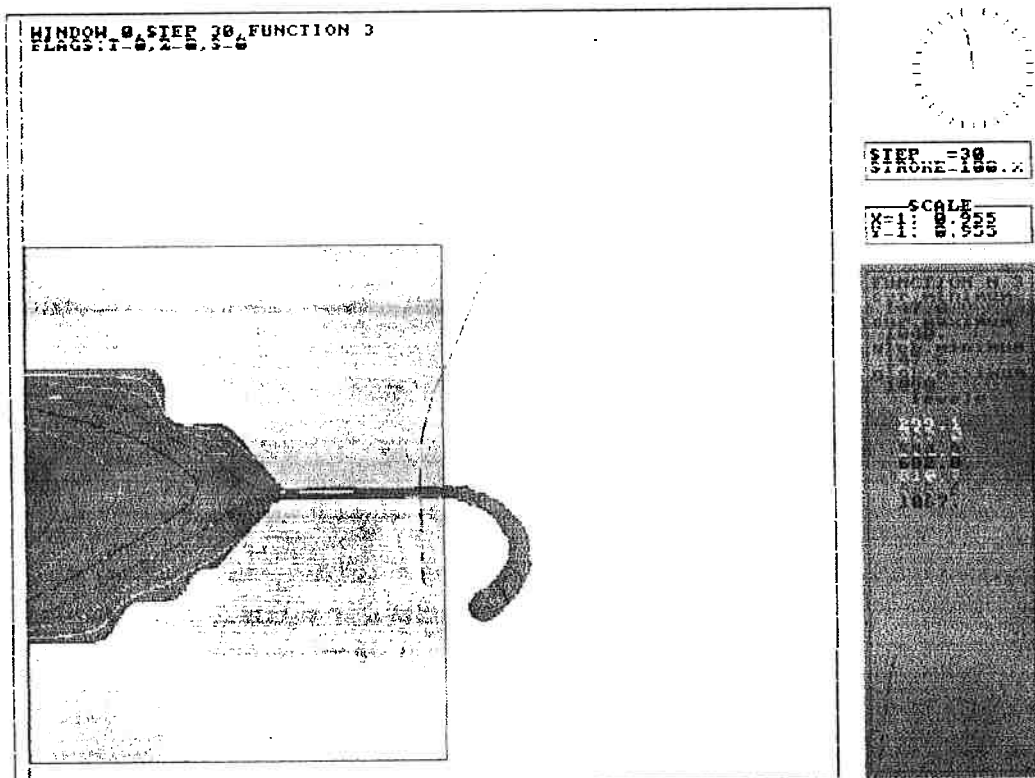


Figura 14 - Perfis de Temperatura para simulação 5.5.4.

15C

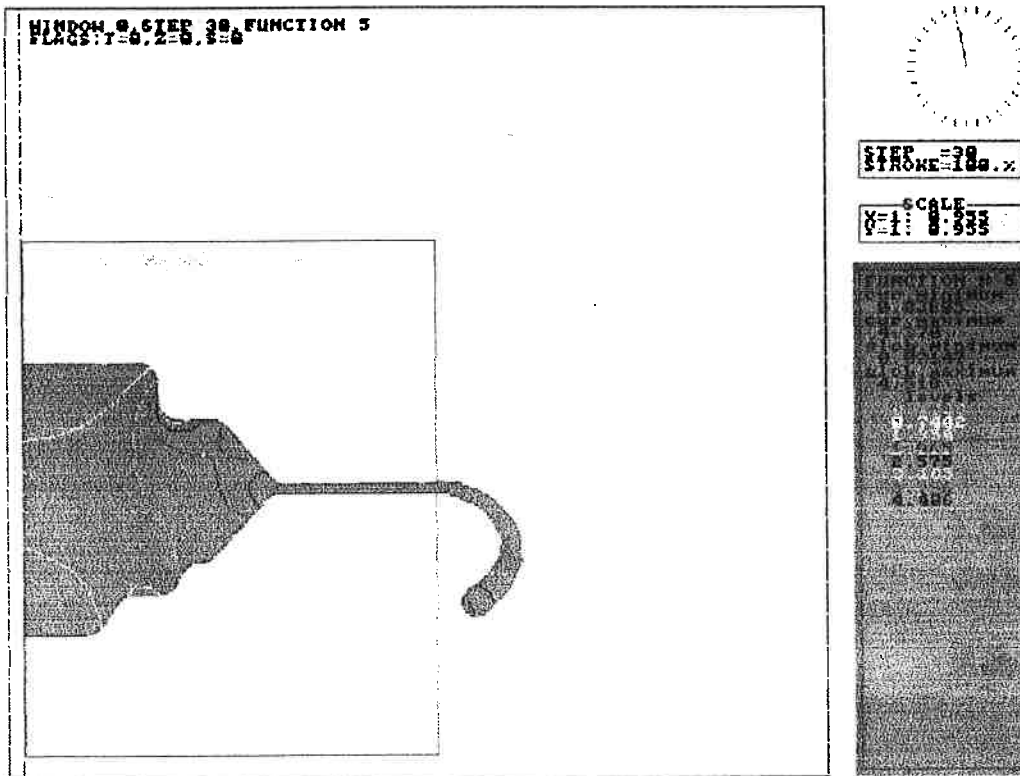


Figura 15 - Perfis de deformação para simulação 5.5.4.

16C

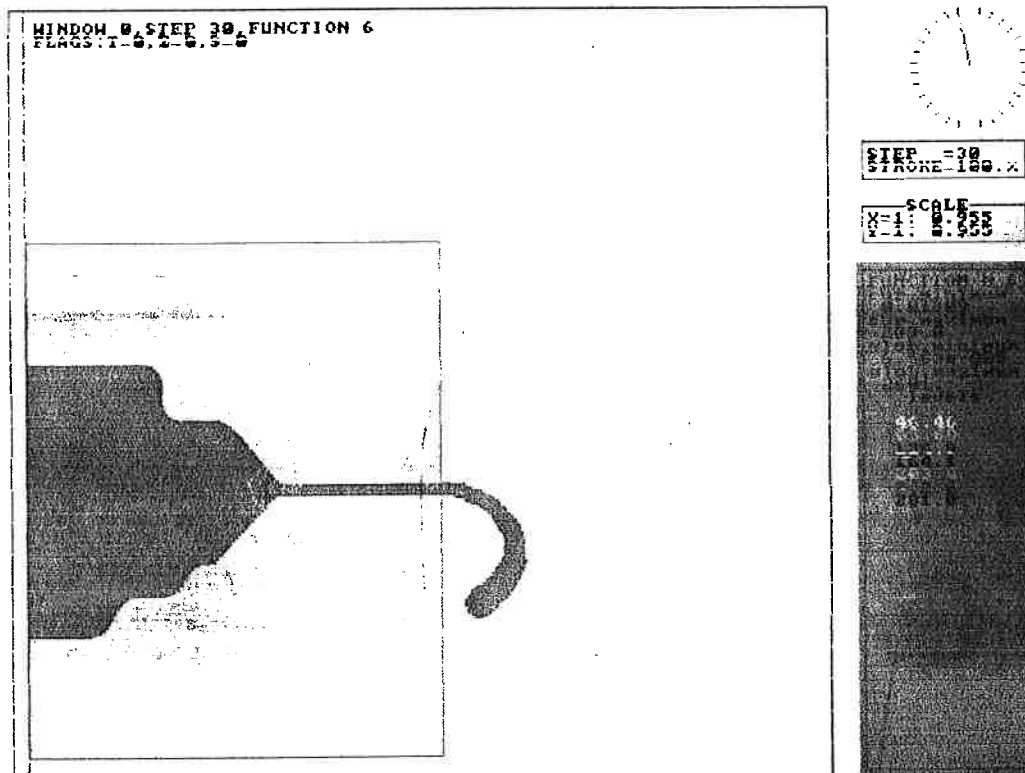


Figura 16 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.5.4.

1D

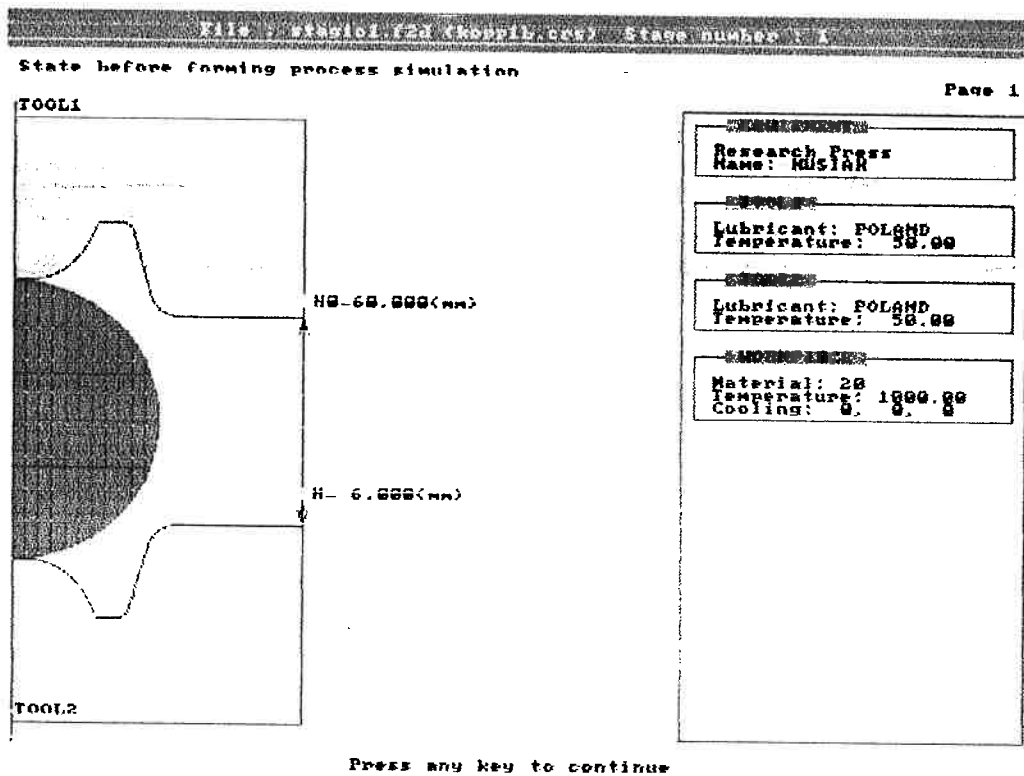


Figura 1 - Parâmetros iniciais da simulação 5.5.5.

2D

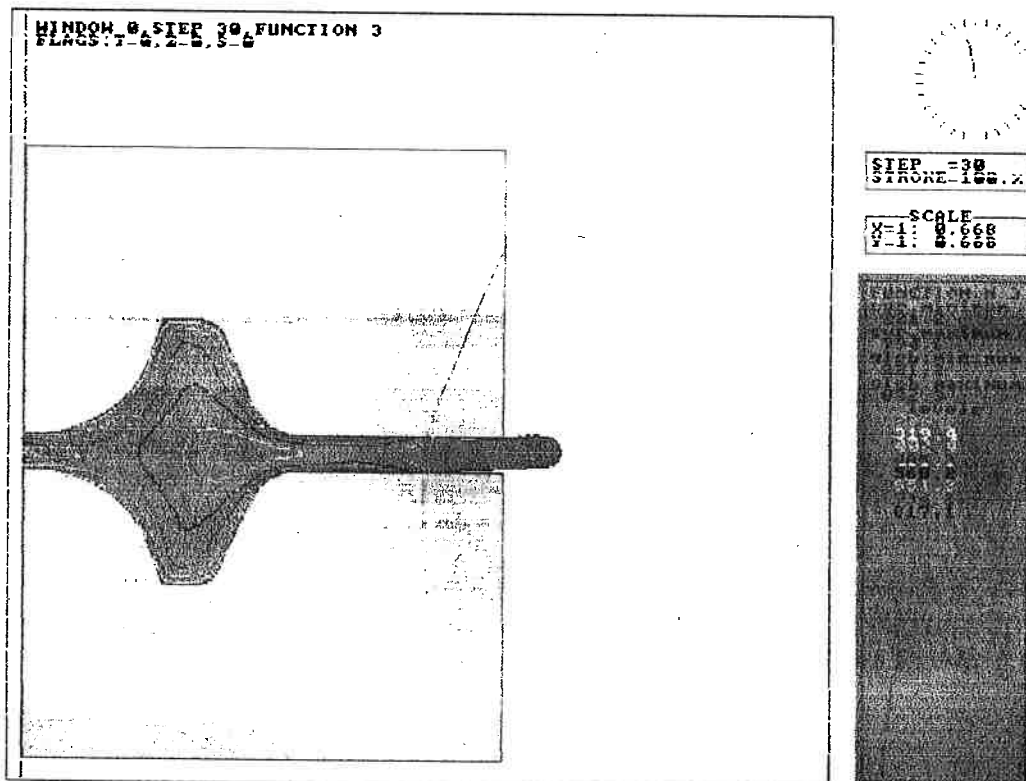


Figura 2 - Perfis de Temperatura para simulação 5.5.5.

3D

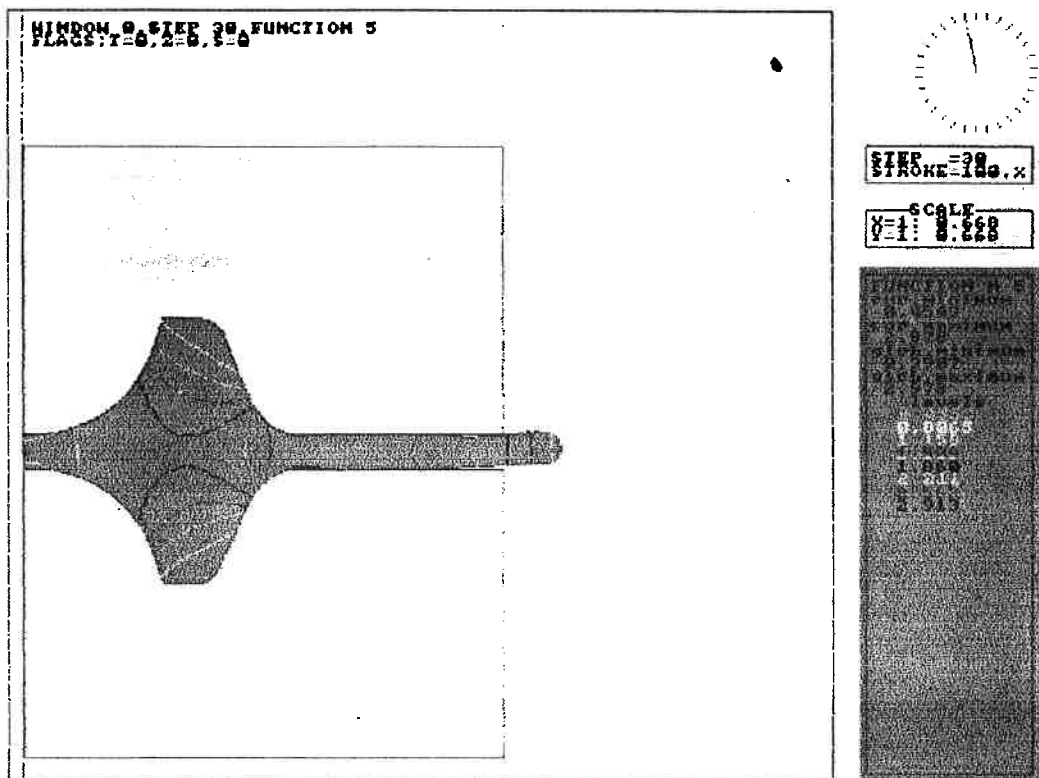


Figura 3 - Perfis de deformação para simulação 5.5.5.

4D

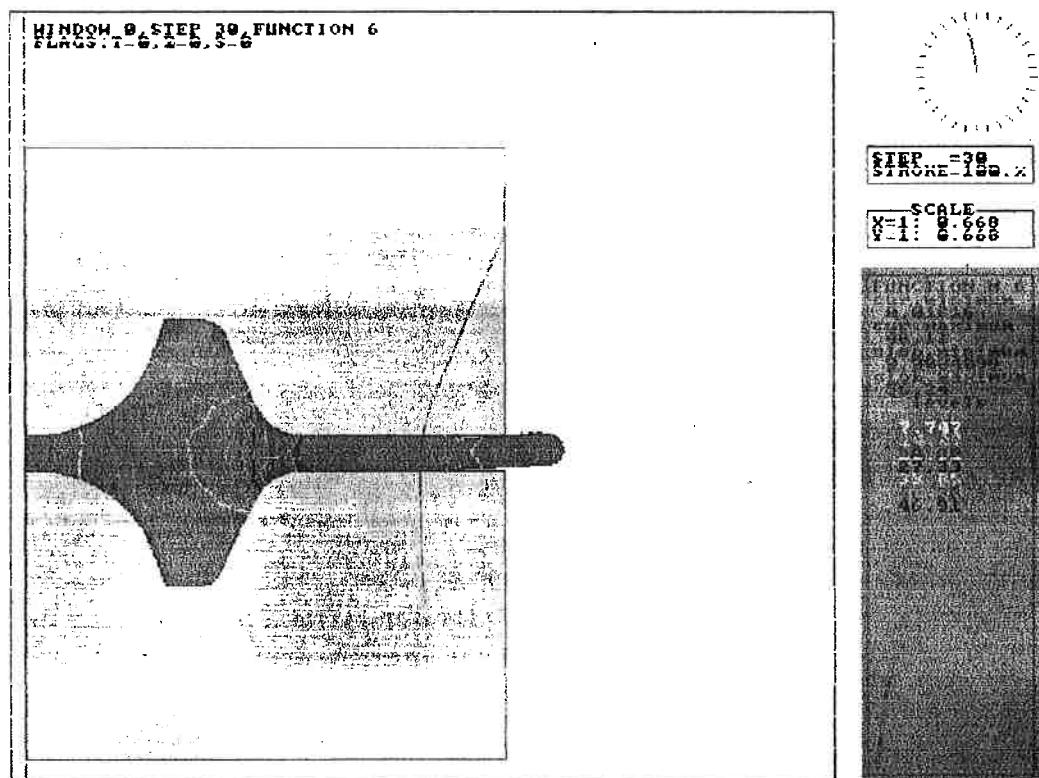


Figura 4 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.5.5.

50

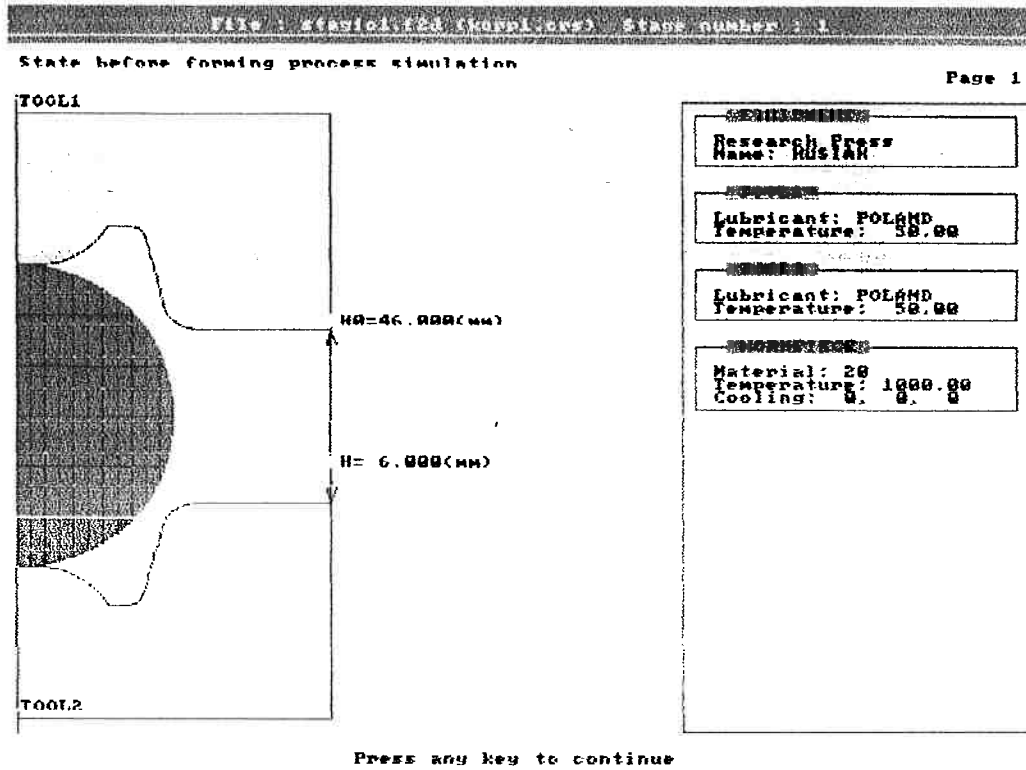


Figura 5 - Parâmetros iniciais da simulação 5.5.6.

60

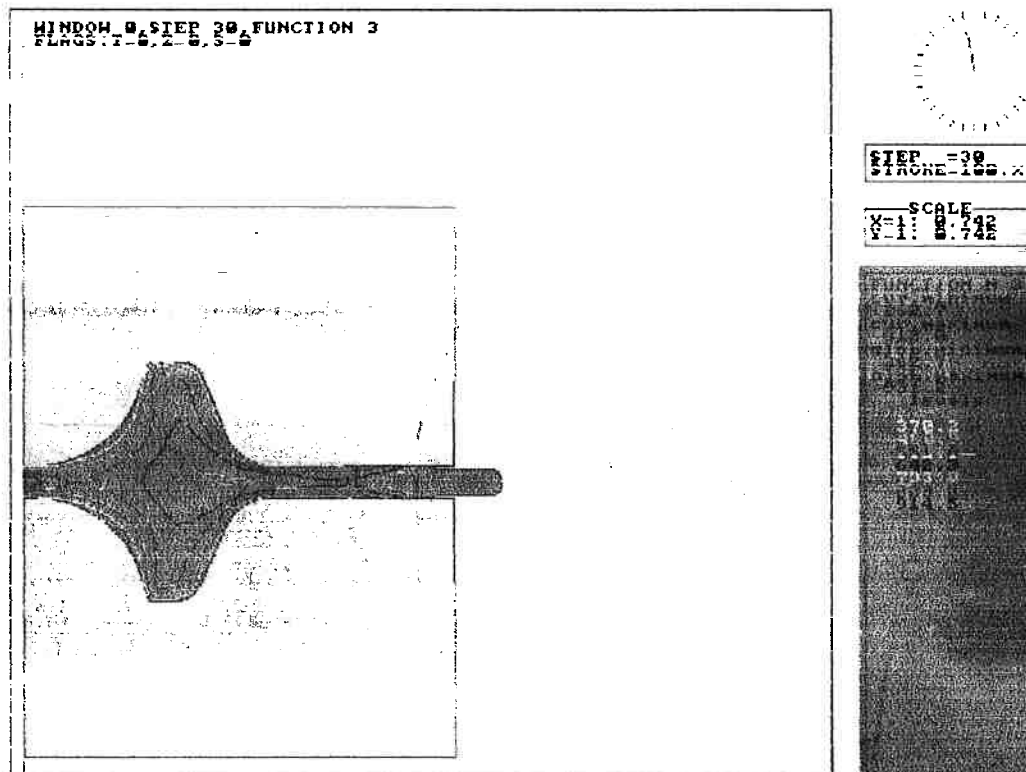


Figura 6 - Perfis de Temperatura para simulação 5.5.6.

7D

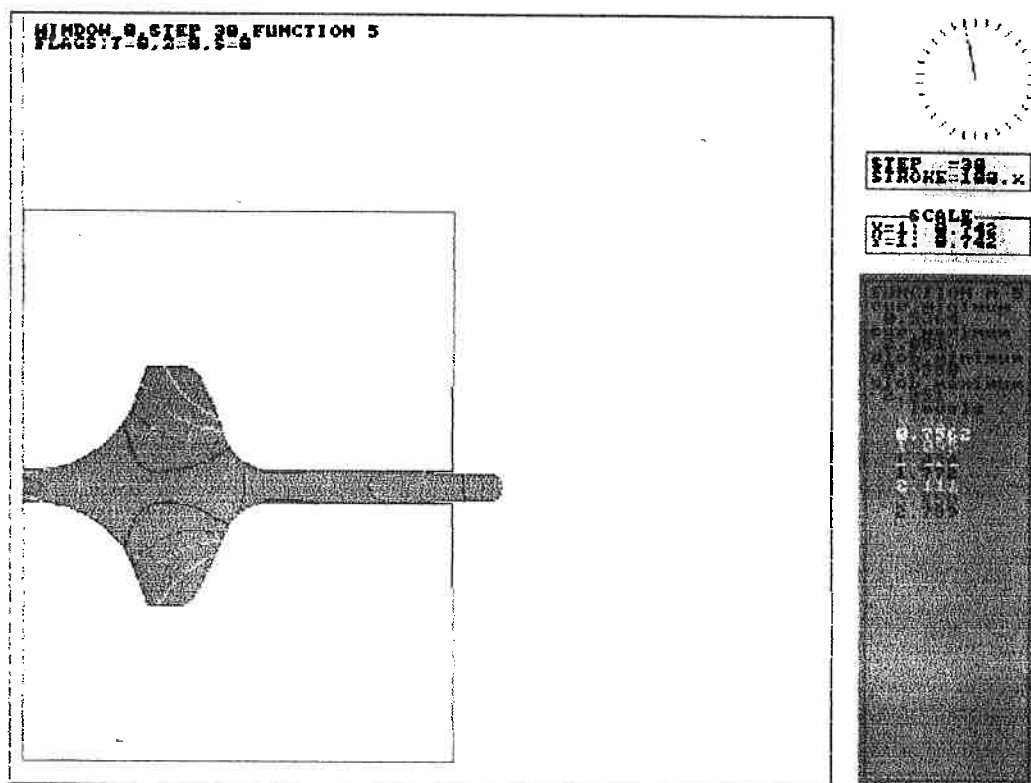


Figura 7 - Perfis de deformação para simulação 5.5.6.

8D

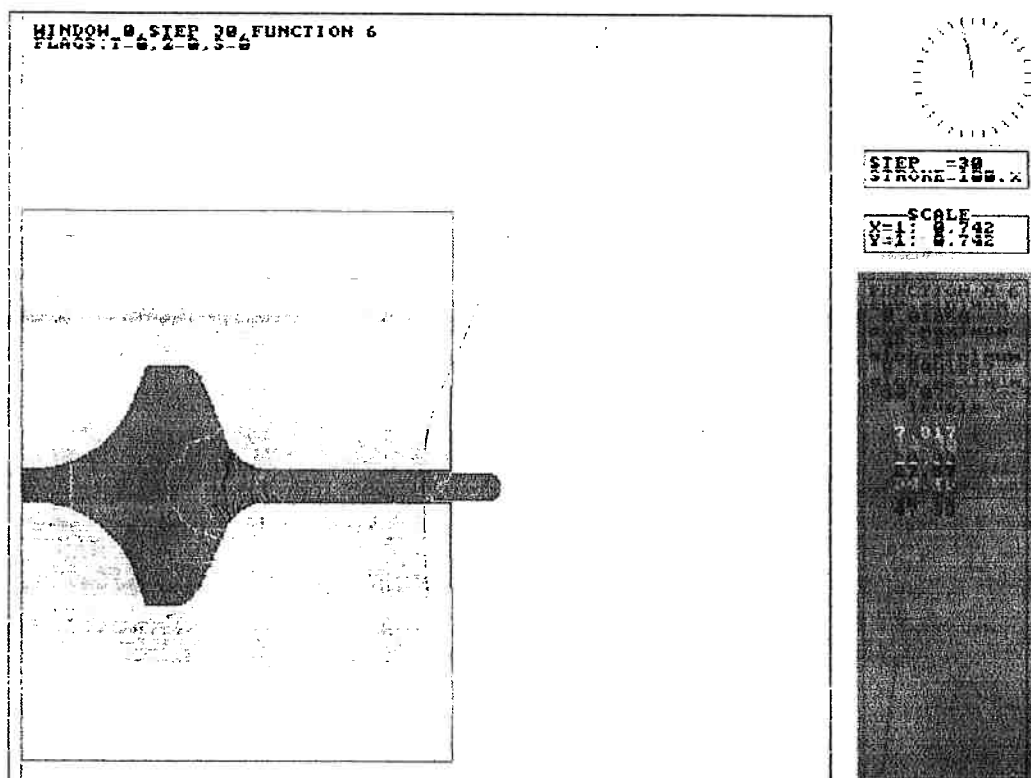


Figura 8 - Perfis de taxa-de-deformação para simulação 5.5.6.

Simulação 5.2.1 1,3 kW/m²L

Ponto	G	Antes da de	Temperatura	Deformaç	Zener-Hollomor.	Deformacao	Sellars	Roberts
1	67,2	1,070	0,80	1,1074E+12	0,20	45,5	62,7	
2	67,2	1,026	0,80	2,8546E+12	0,37	22,6	40,2	
3	67,2	1,100	0,80	6,0119E+11	0,58	16,6	36,5	
4	67,2	1,080	0,80	9,0066E+11	0,58	16,0	35,1	
5	67,2	1,070	5,30	7,3364E+12	0,75	10,4	30,1	
6	67,2	1,100	0,80	6,0119E+11	0,58	16,6	36,5	
7	67,2	1,080	0,80	9,0066E+11	0,58	16,0	35,1	
8	67,2	1,070	5,30	7,3364E+12	0,75	10,4	30,1	
9	67,2	1,070	0,80	1,1074E+12	0,30	30,3	49,6	
10	67,2	1,026	0,80	2,8546E+12	0,40	20,9	38,6	

Simulação 5.2.1 13,0 kW/m²L

Ponto	G	Antes da de	Temperatura	Deformação	Zener-Hollomon	Deformação	Sellars	Roberts
1	67,2	1,070	0,80	1,1074E+12	0,20	45,5	62,7	
2	67,2	1,025	0,80	2,9189E+12	0,39	21,4	39,0	
3	67,2	1,090	0,80	7,3476E+11	0,58	16,3	35,8	
4	67,2	1,080	0,80	9,0066E+11	0,58	16,0	35,1	
5	67,2	1,070	5,30	7,3364E+12	0,76	10,2	29,9	
6	67,2	1,090	0,80	7,3476E+11	0,58	16,3	35,8	
7	67,2	1,080	0,80	9,0066E+11	0,58	16,0	35,1	
8	67,2	1,070	5,30	7,3364E+12	0,76	10,2	29,9	
9	67,2	1,070	0,80	1,1074E+12	0,30	30,3	49,6	
10	67,2	1,025	0,80	2,9189E+12	0,40	20,9	38,5	

Simulação 5.2.1 130,0 kW/m²L

Ponto	G	Antes da de	Temperatura	Deformaç	Zener-Hollomor.	Deformacao	Sellars	Roberts
1	67,2	1,056	1,00	1,8583E+12	0,20	43,4	60,8	
2	67,2	1,000	1,00	6,4392E+12	0,40	19,6	36,5	
3	67,2	1,080	1,00	1,3842E+12	0,60	14,8	34,5	
4	67,2	1,070	1,00	1,7072E+12	0,60	14,6	33,9	
5	67,2	1,060	6,50	7,3179E+12	0,70	11,1	30,6	
6	67,2	1,080	1,00	1,3842E+12	0,60	14,8	34,5	
7	67,2	1,070	1,00	1,7072E+12	0,60	14,6	33,9	
8	67,2	1,060	6,50	1,2079E+13	0,70	10,7	30,6	
9	67,2	1,056	1,00	1,8583E+12	0,30	28,9	48,2	
10	67,2	1,000	1,00	6,4392E+12	0,40	19,6	36,5	

Simulação 5.2.1 1300,0 kW/m2L

Ponto	G	Antes da deformação	Temperatura	Deformação	Zener-Hollomon	Deformação	Sellers	Roberts
1	67,2	1,056	1,40	2,6016E+12	0,23	36,7	56,1	
2	67,2	990	1,40	1,1386E+13	0,44	17,1	33,9	
3	67,2	1,080	1,40	1,5762E+12	0,64	13,8	33,3	
4	67,2	1,070	1,40	1,9379E+12	0,64	13,5	32,7	
5	67,2	1,056	8,90	1,6538E+13	0,75	9,8	29,3	
6	67,2	1,080	1,40	1,5762E+12	0,64	13,8	33,3	
7	67,2	1,070	1,40	1,9379E+12	0,64	13,5	32,7	
8	67,2	1,056	8,90	1,6538E+13	0,75	9,8	29,3	
9	67,2	1,056	1,40	2,6016E+12	0,30	28,1	48,2	
10	67,2	990	1,40	1,1386E+13	0,40	18,8	35,7	

Simulação 5.3.1 Sem lubrificante

Ponto	G	Antes da	Temperatura	Deformação	Zener-Hollomon	Deformação	Sellers	Roberts
1	67,2	1,084	2,00	2,0748E+12	0,20	43,0	64,5	
2	67,2	1,063	2,00	3,2052E+12	0,40	20,7	41,6	
3	67,2	1,100	2,00	1,5030E+12	0,60	14,7	35,8	
4	67,2	1,090	3,50	3,2146E+12	0,60	13,8	35,2	
5	67,2	1,084	5,10	5,2908E+12	0,70	11,4	32,0	
6	67,2	1,100	2,00	1,5030E+12	0,60	14,7	35,8	
7	67,2	1,090	3,50	3,2146E+12	0,60	13,8	35,2	
8	67,2	1,084	5,10	5,2908E+12	0,70	11,4	32,0	
9	67,2	1,084	2,00	2,0748E+12	0,20	43,0	64,5	
10	67,2	1,053	2,00	3,9618E+12	0,40	20,4	40,8	

Simulação 5.4.1. Martelo

Ponto	G	Antes da deformação	Temperatura	Deformação	Zener-Hollomon	Deformação	Sellers	Roberts
1	67,2	1,080	163,00	1,8351E+14	0,24	26,5	57,5	
2	67,2	1,067	163,00	2,4020E+14	0,40	15,6	41,9	
3	67,2	1,098	163,00	1,2748E+14	0,40	16,2	44,6	
4	67,2	1,080	163,00	1,8351E+14	0,60	10,6	34,5	
5	67,2	1,067	500,00	7,3682E+14	0,65	9,1	32,3	
6	67,2	1,098	163,00	1,2748E+14	0,65	10,0	34,2	
7	67,2	1,080	163,00	1,8351E+14	0,65	9,8	33,1	
8	67,2	1,067	500,00	7,3682E+14	0,65	9,1	32,3	
9	67,2	1,080	163,00	1,8351E+14	0,20	31,8	64,0	
10	67,2	1,060	163,00	2,7828E+14	0,44	14,1	39,2	

Simulação 5.2.2 1,3 kW/m2L

Ponto	T.G. Antes da def.	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformacao	Sellers	Roberts
1	67,200	1,045,000	1,222	2,8746E+12	0,500	16,728	35,535
2	67,200	994,000	1,222	9,0481E+12	0,500	15,319	31,994
3	67,200	893,000	1,222	1,1785E+14	1,100	5,916	17,785
4	67,200	944,000	4,000	1,0007E+14	1,100	5,972	19,678
5	67,200	1,070,000	1,222	1,6915E+12	0,600	14,582	33,853
6	67,200	1,045,000	1,222	2,8746E+12	1,100	7,604	23,771
7	67,200	944,000	1,222	3,0570E+13	1,600	4,409	16,765
8	67,200	850,000	1,222	4,0438E+14	1,600	3,808	14,108
9	67,200	850,000	1,222	4,0438E+14	1,100	5,538	16,288
10	67,200	850,000	1,222	4,0438E+14	1,000	6,092	16,933
11	67,200	944,000	1,222	3,0570E+13	1,100	6,414	19,678
12	67,200	994,000	14,000	1,0366E+14	1,100	5,960	21,650
13	67,200	1,045,000	1,222	2,8746E+12	0,500	16,728	35,535
14	67,200	994,000	1,222	9,0481E+12	0,500	15,319	31,994
15	67,200	893,000	1,222	1,1785E+14	1,100	5,916	17,785
16	67,200	944,000	1,222	3,0570E+13	0,600	11,758	26,186

Simulação 5.2.2 13,0 kW/m2L

Ponto	T.G. Antes da def.	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformacao	Sellers	Roberts
1	67,200	1,045,000	2,500	5,8809E+12	0,600	13,177	32,256
2	67,200	995,000	2,500	1,8083E+13	0,600	12,168	29,171
3	67,200	920,000	2,580	1,2006E+14	1,100	5,910	18,772
4	67,200	944,000	2,500	6,2541E+13	1,100	6,137	19,678
5	67,200	1,070,000	2,500	3,4606E+12	0,600	13,732	33,853
6	67,200	1,020,000	2,500	1,0201E+13	1,100	6,904	22,719
7	67,200	920,000	2,500	1,1633E+14	1,600	4,071	16,054
8	67,200	840,000	2,500	1,1172E+15	1,200	4,830	15,418
9	67,200	840,000	2,500	1,1172E+15	1,100	5,269	15,954
10	67,200	840,000	2,500	1,1172E+15	1,100	5,269	15,954
11	67,200	944,000	2,500	6,2541E+13	1,100	6,137	19,678
12	67,200	994,000	16,000	1,1847E+14	1,600	4,066	18,311
13	67,200	1,045,000	2,500	5,8809E+12	0,600	13,177	32,256
14	67,200	995,000	2,500	1,8083E+13	0,600	12,168	29,171
15	67,200	894,000	2,500	2,3454E+14	1,100	5,698	17,821
16	67,200	944,000	2,500	6,2541E+13	0,600	11,252	26,186

Simulação 5.2.2

130,0 kW/m2L

Ponto	T.G. Antes da def.	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformação	Sellers	Roberts
1,00	67,20	1.020,00	7,70	3,142E+13	0,60	11,74	30,70
2,00	67,20	952,00	7,70	1,575E+14	0,60	10,67	26,64
3,00	67,20	905,00	7,70	3,142E+14	1,10	5,61	18,22
4,00	67,20	925,00	7,70	1,735E+13	1,10	6,66	18,96
5,00	67,20	1.047,00	7,70	5,074E+13	0,60	11,39	32,38
6,00	67,20	999,00	7,70	5,349E+14	1,10	5,46	21,85
7,00	67,20	905,00	2,50	6,531E+14	1,60	3,72	15,62
8,00	67,20	858,00	2,50	6,531E+14	1,20	4,96	15,99
9,00	67,20	858,00	2,50	6,531E+14	1,10	5,41	16,56
10,00	67,20	858,00	2,50	6,531E+14	1,10	5,41	16,56
11,00	67,20	905,00	2,50	1,737E+14	1,10	5,79	18,22
12,00	67,20	950,00	16,00	3,440E+14	1,60	3,84	16,95
13,00	67,20	1.020,00	2,50	1,020E+13	0,60	12,66	30,70
14,00	67,20	915,00	2,50	1,328E+14	0,60	10,77	24,57
15,00	67,20	880,00	2,50	3,466E+14	1,10	5,58	17,32
16,00	67,20	905,00	2,50	1,737E+14	0,60	10,62	24,02

Simulação 5.2.2

1300,0 kW/m2L

Ponto	T.G. Antes da def.	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformação	Sellers	Roberts
1	67,200	866,000	3,000	6,2069E+14	0,600	9,938	21,969
2	67,200	795,000	4,000	7,4048E+15	0,600	8,881	18,532
3	67,200	724,000	3,000	6,7893E+16	1,100	4,443	12,480
4	67,200	690,000	3,000	2,5660E+17	1,100	4,239	11,610
5	67,200	970,000	3,000	3,9364E+13	1,000	6,944	21,616
6	67,200	900,000	3,000	2,3874E+14	1,100	5,692	18,037
7	67,200	795,000	3,000	5,5536E+15	1,600	3,371	12,719
8	67,200	724,000	3,000	6,7893E+16	1,300	3,759	11,834
9	67,200	724,000	3,000	6,7893E+16	1,100	4,443	12,480
10	67,200	724,000	3,000	6,7893E+16	1,100	4,443	12,480
11	67,200	760,000	3,000	1,8275E+16	1,100	4,670	13,476
12	67,200	795,000	8,000	1,4810E+16	1,500	3,453	12,998
13	67,200	866,000	3,000	6,2069E+14	0,600	9,938	21,969
14	67,200	905,000	3,000	2,0841E+14	0,600	10,512	24,023
15	67,200	724,000	3,000	6,7893E+16	1,000	4,887	12,882
16	67,200	724,000	3,000	6,7893E+16	0,600	8,145	15,513

Simulação 5.2.2 Martelo

Ponto	T.G. Antes da def.	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformação	Sellers	Roberts
1	67,200	1,070,000	45,000	6,2290E+13	0,600	11,255	33,853
2	67,200	1,108,000	45,000	2,8863E+13	0,600	11,801	36,346
3	67,200	1,070,000	45,000	6,2290E+13	1,200	5,627	23,823
4	67,200	1,070,000	175,000	2,4224E+14	1,100	5,688	24,848
5	67,200	1,070,000	45,000	6,2290E+13	0,600	11,255	33,853
6	67,200	1,070,000	45,000	6,2290E+13	1,000	6,753	26,040
7	67,200	1,070,000	45,000	6,2290E+13	1,300	5,194	22,929
8	67,200	1,047,000	45,000	1,0138E+14	1,500	4,376	20,633
9	67,200	1,016,000	45,000	2,0093E+14	1,100	5,745	22,552
10	67,200	1,016,000	45,000	2,0093E+14	1,100	5,745	22,552
11	67,200	1,020,000	45,000	1,8362E+14	1,100	5,773	22,719
12	67,200	1,020,000	175,000	7,1407E+14	1,400	4,230	20,322
13	67,200	1,070,000	45,000	6,2290E+13	0,600	11,255	33,853
14	67,200	1,070,000	45,000	6,2290E+13	0,600	11,255	33,853
15	67,200	995,000	45,000	3,2550E+14	1,200	5,134	20,839
16	67,200	1,025,000	45,000	1,6419E+14	0,600	10,649	31,004

Simulação 5.3.2 Sem Lubrificante

Ponto	T.G. Antes da def.	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformação	Sellers	Roberts
1	67,200	1,030,000	1,200	3,9184E+12	0,600	13,597	31,315
2	67,200	1,000,000	2,500	1,6098E+13	0,600	12,263	29,473
3	67,200	966,000	0,600	8,6791E+12	1,000	7,683	21,448
4	67,200	966,000	0,600	8,6791E+12	1,000	7,683	21,448
5	67,200	1,066,000	0,600	9,0288E+11	0,700	13,239	30,984
6	67,200	1,034,000	0,600	1,7938E+12	1,000	8,704	24,398
7	67,200	985,000	0,600	5,4917E+12	0,600	13,246	28,573
8	67,200	932,000	0,600	2,0408E+13	0,600	12,070	25,509
9	67,200	932,000	0,600	2,0408E+13	0,600	12,070	25,509
10	67,200	932,000	0,600	2,0408E+13	1,100	6,584	19,221
11	67,200	1,000,000	0,600	3,8635E+12	1,100	7,425	21,894
12	67,200	1,034,000	4,200	1,2557E+13	0,500	14,969	34,756
13	67,200	1,030,000	0,600	1,9592E+12	0,500	17,276	34,475
14	67,200	100,000	0,600	3,1118E+43	0,500	3,654	6,209
15	67,200	966,000	0,600	8,6791E+12	1,000	7,683	21,448
16	67,200	966,000	0,600	8,6791E+12	0,600	12,804	27,453

Simulação 5.5.1

Ponto	G. Antes da de	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformacao	Sellars	Roberts
1	100,000	620,000	25,000	4,5429E+19	0,200	24,312	20,245
2	100,000	554,000	25,000	1,3018E+21	0,200	22,332	15,154
3	100,000	860,000	25,000	6,1589E+15	0,800	8,189	21,854
4	100,000	750,000	25,000	2,1726E+17	1,300	4,400	13,848
5	100,000	600,000	25,000	1,1903E+20	0,500	9,480	13,312
6	100,000	810,000	25,000	2,8440E+16	0,800	7,699	19,376
7	100,000	682,000	25,000	2,9642E+18	1,200	4,381	12,212
8	100,000	600,000	25,000	1,1903E+20	0,600	7,900	12,276
9	100,000	600,000	25,000	1,1903E+20	0,600	7,900	12,809

Simulação 5.5.2

Ponto	G. Antes da de	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformacao	Sellars	Roberts
1	100,000	620,000	32,000	5,8150E+19	0,400	12,075	15,240
2	100,000	540,000	32,000	3,6416E+21	0,700	6,229	10,151
3	100,000	930,000	32,000	1,1463E+15	1,100	6,419	21,993
4	100,000	800,000	32,000	5,0288E+16	1,400	4,306	15,034
5	100,000	590,000	32,000	2,5078E+20	0,700	6,643	11,533
6	100,000	810,000	32,000	3,6404E+16	1,000	6,102	17,599
7	100,000	681,000	32,000	3,9538E+18	1,400	3,723	11,614
8	100,000	450,000	32,000	1,1426E+24	1,500	2,578	7,463
9	100,000	450,000	32,000	1,1426E+24	0,700	5,524	8,273

Simulação 5.5.3

Ponto	G. Antes da de	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformacao	Sellars	Roberts
1	100,000	600,000	7,200	3,4280E+19	0,500	9,799	13,219
2	100,000	600,000	7,200	3,4280E+19	0,540	9,073	12,876
3	100,000	880,000	7,200	1,0072E+18	1,000	5,437	20,635
4	100,000	678,000	7,200	2,7035E+20	0,900	5,157	13,315
5	100,000	560,000	7,200	1,1315E+16	0,500	12,776	11,767
6	100,000	800,000	7,200	3,4280E+19	1,000	4,900	17,194
7	100,000	600,000	7,200	2,2516E+24	1,300	2,936	9,972
8	100,000	421,000	7,200	3,4280E+19	1,800	2,722	7,080
9	100,000	600,000	7,200	3,4280E+19	0,700	6,999	11,840

Simulação 5.5.4

Ponto	G. Antes da de	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformacao	Sellars	Roberts
1	100,000	630,000	7,000	7,9852E+18	0,400	12,762	15,725
2	100,000	554,000	7,000	3,6451E+20	1,100	4,188	9,415
3	100,000	900,000	7,000	5,5706E+14	1,300	5,625	19,154
4	100,000	720,000	7,000	1,8437E+17	1,300	4,425	12,957
5	100,000	620,000	7,000	1,2720E+19	1,900	2,651	9,483
6	100,000	810,000	7,000	7,9633E+15	0,700	9,258	20,574
7	100,000	682,000	7,000	8,2998E+17	1,100	4,973	12,562
8	100,000	510,000	7,000	4,6738E+21	1,300	3,335	8,366
9	100,000	554,000	7,000	3,6451E+20	0,700	6,581	10,513

Simulação 5.5.5

Ponto	T.G. Antes da def.	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformacao	Sellars	Roberts
1	67,200	826,500	1,200	8,1140E+14	0,880	6,687	16,965
2	67,200	826,500	1,200	8,1140E+14	0,600	9,808	20,007
3	67,200	826,500	4,000	2,7047E+15	1,200	4,638	14,999
4	67,200	963,000	7,800	1,2144E+14	1,120	5,801	20,249
5	67,200	826,500	7,800	5,2741E+15	1,600	3,378	13,499
6	67,200	930,000	7,800	2,7941E+14	1,120	5,544	18,995
7	67,200	1,035,000	7,800	2,2813E+13	1,120	6,419	23,148
8	67,200	1,099,500	20,000	1,5180E+13	1,680	4,397	21,348
9	67,200	826,500	7,800	5,2741E+15	1,280	4,223	14,638
10	67,200	963,000	7,800	1,2144E+14	1,120	5,801	20,249
11	67,200	826,500	1,200	8,1140E+14	0,880	6,687	16,965
12	67,200	826,500	1,200	8,1140E+14	0,640	9,195	19,440

Simulação 5.5.6

Ponto	T.G. Antes da def.	Temperatura	Taxa Deformação	Zener-Hollomon	Deformacao	Sellars	Roberts
1	67,200	729,000	32,000	6,0013E+17	0,800	5,665	14,089
2	67,200	729,000	32,000	6,0013E+17	0,800	5,665	14,089
3	67,200	727,500	32,000	6,3481E+17	1,120	4,039	12,499
4	67,200	912,000	32,000	1,8416E+15	1,360	4,164	16,894
5	67,200	912,000	32,000	1,8416E+15	1,360	4,164	16,894
6	67,200	912,000	32,000	1,8416E+15	1,360	4,164	16,894
7	67,200	912,000	32,000	1,8416E+15	1,360	4,164	16,894
8	67,200	912,000	32,000	1,8416E+15	1,360	4,164	16,894
9	67,200	750,000	32,000	2,7810E+17	1,760	2,642	11,351
10	67,200	825,000	32,000	2,2670E+16	1,360	3,745	14,269
11	67,200	729,000	32,000	6,0013E+17	0,960	4,721	13,207
12	67,200	729,000	32,000	6,0013E+17	0,960	4,721	13,207