

MÁRCIO HIDEMI HABE

**AVALIAÇÃO DO FATOR DE ATRITO EMPREGANDO O ENSAIO DE
COMPRESSÃO DE ANEL E O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a conclusão do
Curso de Engenharia.

São Paulo
2007

MÁRCIO HIDEMI HABE

AVALIAÇÃO DO FATOR DE ATRITO EMPREGANDO O ENSAIO DE
COMPRESSÃO DE ANEL E O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para a conclusão do
Curso de Engenharia.

Área de concentração:
ENGENHARIA METALÚRGICA

Orientador:
Prof. Dr. Ronald Lesley Paut

São Paulo
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Habe, Márcio Hidemi

**Avaliação do fator de atrito empregando o ensaio de compressão de anel e o método de elementos finitos / M. H. Habe, São Paulo, 2007.
62 p.**

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

**1. Ensaio de compressão de anel 2. Elementos finitos
Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II. t.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ronald Lesley Plaut, pela orientação e dedicação no desenvolver deste trabalho.

Aos funcionários do laboratório PECE pela disponibilização dos computadores onde estava instalado o software QFORM.

RESUMO

O ensaio de compressão de anel é utilizado para determinar o fator atrito entre a peça a ser deformada plasticamente e o ferramental.

Neste ensaio são utilizadas curvas de calibração que relacionam a evolução da geometria do anel durante o ensaio, em função do material ensaiado e do lubrificante em estudo. O valor do fator de atrito pode ser determinado com base na evolução da geometria do anel e das “curvas de calibração”.

Se, adicionalmente, o carregamento durante o ensaio for registrado, é possível, através de curvas de pressão média relativa, determinar a tensão de escoamento do material. Por outro lado, o procedimento inverso pode ser aplicado igualmente, isto é, conhecida a curva de escoamento é possível determinar as forças e deslocamentos no anel em estudo.

No presente trabalho objetiva-se simular, através de um software de elementos finitos (QFORM), o ensaio de compressão de anel de aço na temperatura ambiente (25°C) e em elevadas temperaturas (950 à 1050°C). São também geradas as curvas de calibração para o fator de atrito bem como as curvas de pressão média relativa.

Ambas estas curvas são comparadas com aquelas determinadas por Y. J. Hwu (empregando os conceitos de Avitzur), que realizou o ensaio de compressão de anel de aço para uma geometria 6:3:2, para ensaios na temperatura ambiente e em altas temperaturas .

Os resultados indicam boa coerência entre as curvas de calibração obtidas pelo método de elementos finitos e as determinadas por Y.J.Hwu, tanto para a geometria como para as pressões relativas, principalmente para a temperatura ambiente.

Palavras-chaves: ensaio de compressão de anel, elementos finitos.

ABSTRACT

The ring compression test is used for the evaluation of the friction factor between the plastically deforming material and the die.

In this test, calibration curves are used, relating geometry changes during actual testing with the material and lubricant to be evaluated. The friction factor can be determined through the geometry changes and the "calibration curves".

If, in addition, the loading during testing is recorded, through the average pressure curves, actual stress–strain curves can be assessed. Conversely, knowing the stress-strain curves, load- displacement curves can be determined for the ring test.

In this study, the finite element method program (Q form) is used to simulate a steel ring both at room and at high temperature (950 up to 1050°C). The friction factor calibration and average pressure curves are also generated.

Both curves are compared with the results published by Y.J. Hwu (based on the approach of Avitzur), performed on steel rings for the 6:3:2 geometry, both for room and high temperature.

Results indicate good coherence between the calibration curves obtained through the finite element method and those determined by Y.J. Hwu for average pressure and geometry, mainly for the room temperature results.

Keywords: ring compression test, finite element.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução | 1 |
| 2. Objetivos | 2 |
| 3. Resumo Teórico | 3 |
| 3.1 O Fator de atrito(m) e o atrito: | 3 |
| 3.2 Ensaio de compressão de anel | 4 |
| 3.3 Curvas de calibração | 6 |
| 3.4 Geometria do anel | 7 |
| 3.5 Curvas de pressão média relativa no ensaio de compressão de anel | 9 |
| 3.6 Influencia da temperatura no ensaio de compressão de anel | 10 |
| 3.7 Resumo Histórico | 10 |
| 3.8 QForm2D/3D | 12 |
| 4. Trabalho utilizado para comparar com elementos finitos | 13 |
| 4.1 Análise a temperatura ambiente | 13 |
| 4.2 Análise a elevadas temperaturas | 18 |
| 4.3 Cálculo da pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) determinado por Y. J. Hwu et al (empregando os conceitos de Avitzur). | 21 |
| 4.4 Cálculo do raio neutro (R_n) determinado por Y. J. Hwu et al (empregando os conceitos de Avitzur).. | 24 |
| 4.5 Considerações sobre o trabalho de Y. J. Hwu et al. | 25 |
| 6. Simulação QForm | 26 |
| 6.1 Dados de entrada | 26 |
| 6.1.1 Geometria do anel | 26 |
| 6.1.2 Criação do material para a simulação na temperatura ambiente | 27 |
| 6.1.3 Criação do lubrificante para a simulação na temperatura ambiente | 29 |
| 6.1.4 Criação do material para a simulação em elevadas temperaturas | 30 |
| 6.1.5 Criação do lubrificante para a simulação em elevadas temperaturas. | 32 |
| 6.2 Condições de contorno | 32 |
| 6.3 Dados de saída do QForm | 34 |
| 6.3.1 Evolução da geometria do anel | 35 |
| 6.3.2 Gráficos | 35 |
| 6.3.3 Imagens geradas para localizar a superfície neutra | 37 |
| 6.4 Tratamento dos dados | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 7. Comparação dos resultados | 39 |
| 7.1 Comparação dos resultados na temperatura ambiente | 39 |
| 7.1.1 Comparação das curvas de calibração | 39 |
| 7.1.2 Comparação da pressão média (P_{ave}) | 40 |
| 7.1.3 Comparação da pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) | 42 |
| 7.2 Comparação dos resultados em elevadas temperaturas | 44 |
| 7.2.1 Comparação das curvas de calibração | 44 |
| 7.2.2 Comparação da pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) | 46 |
| 8 Discussão e Conclusão | 48 |
| 9 Bibliografia | 51 |
| Apendice A | 52 |
| Apendice B | 53 |
| Apendice C | 54 |
| Apendice D | 55 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 3.1 | Deformação do anel | 4 |
| Figura 3.2 | Indicação da superfície neutra (S_n) do anel e do raio neutro (R_n). | 5 |
| Figura 3.3 | Dimensões do diâmetro interno, diâmetro externo e altura do anel | 5 |
| Figura 3.4 | Comparação das curvas de calibração para determinação do fator de atrito entre materiais diferentes | 6 |
| Figura 3.5 | Proporções mais utilizadas na geometria de anel em ensaios de compressão de anel. | 7 |
| Figura 3.6 | Variação das curvas de calibração para fator de atrito com a geometria do anel. | 8 |
| Figura 3.7 | Representação da influência do fator de atrito nas curvas de Pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) versus Redução em altura (R_h). | 9 |
| Figura 3.8 | Janela sobre do programa Qform | 12 |
| Figura 4.1 | Curvas de calibração para fator de atrito interfacial em anel de geometria 6:3:2. | 14 |
| Figura 4.2 | Variação do fator de atrito do lubrificante teflon em função da redução em altura em diversas taxas de deformação e tipos de carregamento. [1] | 15 |
| Figura 4.3 | Variação do fator de atrito para o ensaio sem a utilização de lubrificante | 15 |
| Figura 4.4 | Curvas de pressão média relativa em anel de aço, para uma geometria 6:3:2. | 16 |
| Figura 4.5 | Pressão média (P_{ave}), tensão de escoamento (σ_{ave}) e pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}), quando o filme de teflon é utilizado como lubrificante. [1] | 17 |
| Figura 4.6 | Pressão média (P_{ave}), tensão de escoamento média (σ_{ave}) e pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}), sem a utilização de lubrificante. [1] | 17 |
| Figura 4.7 | Curva tensão verdadeira - deformação verdadeira obtida no carregamento tipo I, para as duas condições de lubrificação[1] | 18 |
| Figura 4.8 | Curva tensão verdadeira - deformação verdadeira obtida nos | 18 |

carregamentos tipo I e II. [1]

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 4.9 | Efeito da taxa de deformação sobre a tensão de escoamento na temperatura de 1000°C. | 20 |
| Figura 4.10 | Efeito da temperatura sobre a tensão de escoamento na taxa de deformação de 10s-1. | 20 |
| Figura 4.11 | Comparação da tensão de escoamento obtida no ensaio de compressão de anel e o obtido por CANMET | 21 |
| Figura 5.1 | Geometria do anel escolhido para simulação | 26 |
| Figura 5.2 | Janela do programa QDraft mostrando o eixo de rotação e o layout da peça e a ferramenta. | 27 |
| Figura 5.3 | Comparação das curvas de escoamento dada pelo cálculo de ALTAN e encontrada analiticamente por Y. J. Hwu et al. [1] | 28 |
| Figura 5.4 | Janela de criação do material para simulação a temperatura ambiente | 28 |
| Figura 5.5 | Janela de criação do lubrificante para simulação a temperatura ambiente. | 30 |
| Figura 5.6 | Janela da criação do material para simulação em elevadas temperaturas. | 31 |
| Figura 5.7 | Condições de contorno do programa Qform | 33 |
| Figura 5.8 | Réguas do programa QForm. | 35 |
| Figura 5.9 | Janela de escolhas das variáveis para gerar gráficos no Qform | 36 |
| Figura 5.10 | Janela do gráfico da distância (altura do anel) versus a carga (P) | 36 |
| Figura 5.11 | Figura representando os vetores de velocidade | 37 |
| Figura 6.1 | Curvas de calibração para fator de atrito na temperatura ambiente | 39 |
| Figura 6.2 | Pontos da curvas de calibração geradas a partir do QFORM sobre as curvas de calibração obtidas por Y. J. Hwu et al. | 40 |
| Figura 6.3 | Comparação da pressão média (Pave) versus deformação gerada a partir do QFORM com a experimental de Y. J. Hwu et al para fator de atrito igual a 0,07 | 41 |
| Figura 6.4 | Comparação da pressão média (Pave) versus deformação gerada a partir do QFORM com a experimental de Y. J. Hwu et al para fator de atrito igual a 0,5. | 41 |
| Figura 6.5 | Curvas de pressão média relativa para fator de atrito na | 42 |

temperatura ambiente.

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 6.6 | Pontos da pressão média relativa gerados a partir do QFORM sobre as curvas determinadas por Y. J. Hwu et al. | 42 |
| Figura 6.7 | Curvas de calibração para fator de atrito em elevadas temperaturas | 44 |
| Figura 6.8 | Pontos da curvas de calibração geradas a partir do QFORM sobre as curvas de calibração obtidas por Y. J. Hwu et al. | 44 |
| Figura 6.9 | Comparação entre as curvas de calibração para fator de atrito geradas a partir do QFORM na temperatura ambiente e em elevadas temperaturas. | 45 |
| Figura 6.10 | Curvas de pressão média relativa para fator de atrito na temperatura ambiente | 46 |
| Figura 6.11 | Pontos da pressão média relativa geradas a partir do QFORM sobre as curvas determinadas por Y. J. Hwu et al. | 46 |
| Figura 6.12 | Comparação entre as curvas de pressão média relativas geradas a partir do QFORM na temperatura ambiente e em elevadas temperaturas. | 47 |
| Figura B1 | Curvas da carga versus deformação, geradas pelo QFORM na temperatura ambiente (20°C). | 53 |
| Figura B2 | Curvas da carga versus deformação, geradas pelo QFORM em temperaturas elevadas (1000°C). | 53 |
| Figura C1 | Curvas de pressão média versus deformação, geradas pelo QFORM na temperatura ambiente (20°C). | 54 |
| Figura C2 | Curvas de pressão média versus deformação, geradas pelo QFORM em temperaturas elevadas (1000°C). | 54 |
| Figura D1 | Curvas de escoamento versus deformação, geradas pela equação de MISAKA para temperaturas de 900°C | 55 |
| Figura D2 | Curvas de escoamento versus deformação, geradas pela equação de MISAKA para temperaturas de 1000°C. | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|---|----|
| Tabela 3.1 | Alguns trabalhos sobre o ensaio de compressão em ordem cronológica | 11 |
| Tabela 4.1 | Material utilizado a temperatura ambiente | 13 |
| Tabela 4.2 | Experimentos realizados pelos autores Yhu-Jew-Hwu et al na temperatura ambiente | 14 |
| Tabela 4.3 | Material utilizado em elevadas temperaturas | 18 |
| Tabela 4.4 | Experimentos realizados por Yhu-Jew-Hwu et al, em elevadas temperaturas | 19 |
| Tabela 5.1 | K e n encontrados nas curvas de Y. J. Hwu et al | 27 |
| Tabela 5.2 | Fatores de atrito da literatura e os adotados no QForm | 29 |
| Tabela A1 | Valores retirados do QFORM na temperatura ambiente | 52 |
| Tabela A2 | Valores retirados do QFORM na temperatura de 1000°C | 52 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

| | | |
|------------------------|---|--|
| m | = | fator de atrito |
| μ | = | coeficiente de atrito |
| d | = | diâmetro interno do anel |
| d_i | = | diâmetro interno inicial do anel |
| d_f | = | diâmetro interno final do anel |
| D | = | diâmetro externo do anel |
| D_i | = | diâmetro externo inicial do anel |
| D_f | = | diâmetro externo final do anel |
| h | = | altura do anel |
| h_i | = | altura inicial do anel |
| h_f | = | altura final do anel |
| S_n | = | superfície neutra |
| R_n | = | raio neutro |
| R_h | = | redução em altura do anel |
| R_d | = | redução (variação) do diâmetro interno do anel |
| ε | = | deformação |
| P_{ave} | = | Pressão média |
| σ_{ave} | = | Tensão média de escoamento |
| P_{ave}/σ_{ave} | = | Pressão média relativa |
| P | = | Carga aplicada pelo equipamento |
| A | = | Área de contato interfacial peça-ferramenta |
| π | = | constante pi |
| 2D | = | duas dimensões |
| 3D | = | três dimensões |

1. Introdução

O estudo do atrito na interface ferramenta-peça é fundamental na conformação de materiais, pois afeta diretamente o fluxo do material, o campo de tensões, a temperatura na peça, os esforços exigidos pelo equipamento e sobretudo, a qualidade do produto final durante a deformação.

O ensaio de compressão de anel tem mostrado ser uma das melhores formas para quantificar o atrito, devido principalmente a sua facilidade, pois basta apenas acompanhar a geometria do anel durante a deformação. A variação do diâmetro interno do anel com atrito durante a deformação (ou variação da altura do anel) é um meio sensível para quantificar o atrito entre a peça e o ferramental, quando o atrito é nulo, o anel se comporta como um cilindro ao ser comprimido. Ao aumentar o atrito, o anel passa a deformar em direção ao centro.

Se for coletada a carga aplicada durante a deformação do material, é possível determinar também a curva da tensão verdadeira-deformação verdadeira, através das curvas de pressão média relativa teórica. O processo inverso também pode ser realizado, ou seja, através da tensão de escoamento é possível determinar a carga aplicada.

No presente trabalho será simulado em um software de elementos finitos (QFORM) o ensaio de compressão de anel de aço na temperatura ambiente (25°C) e em elevadas temperaturas (950 à 1050°C). Por elementos finitos é possível encontrar dados suficientes para gerar as curvas de calibração para determinar o fator de atrito geometricamente e as curvas de pressão média relativa.

Ambas estas curvas são comparadas com aquelas determinadas por Y. J. Hwu (empregando os conceitos de Avitzur), que realizou o ensaio de compressão de anel de aço para uma geometria 6:3:2, para ensaios na temperatura ambiente e em altas temperaturas.

2. Objetivos

O intuito deste trabalho é analisar o atrito pelo ensaio de compressão de anel de aço por elementos finitos (QFORM). As seguintes análises serão efetuadas:

- Comparação entre as curvas de calibração para determinar o fator de atrito (m) geometricamente:
 - Em elementos finitos, as curvas foram geradas em diversas taxas de deformação ($0,1 \text{ s}^{-1}$, 1 s^{-1} , 10 s^{-1}), na temperatura ambiente (20°C) e em elevadas temperaturas (950°C , 1000°C e 1050°C).
 - As curvas geradas por elementos finitos serão comparadas entre si e com as determinadas por Y. J. Hwu et al, que emprega os conceitos de Avitzur.
- Comparação entre as curvas de pressão relativa média P_{ave}/σ_{ave} :
 - Em elementos finitos, as curvas foram geradas utilizando taxas de deformação igual a 10 s^{-1} , na temperatura ambiente (20°C) e em elevadas temperaturas (950°C , 1000°C e 1050°C).
 - As curvas geradas por elementos finitos serão comparadas entre si e com as determinadas por Y. J. Hwu et al, que emprega os conceitos de Avitzur.
- Comparar as curvas experimentais dadas na temperatura ambiente, da pressão média versus a deformação de Y. J. Hwu et al. com as curvas geradas por elementos finitos.

3. Resumo Teórico

3.1 O Fator de atrito(m) e o atrito:

O fator de atrito (μ), também chamado de fator de cisalhamento de atrito, é utilizado para quantificar o atrito em estudos de conformação de materiais. Pode variar de zero a um, sendo zero quando a interface matriz-peça está sem atrito, e um, quando o atrito é máximo.

O atrito tem papel significante, por exemplo:

- Na vida da matriz (ou ferramenta) → Um atrito excessivo gera muito calor, além da matriz (ou ferramenta) sofrer maior desgaste e descamação, contribuindo para sua falha prematura;
- Nos esforços realizados pelo equipamento durante a conformação → Em conformação de materiais, o equipamento necessita fornecer carga suficiente para deformar o material e compensar a força de atrito contrária ao movimento de deformação;
- No fluxo do material que está sendo conformado → O atrito influencia diretamente o modo como o material irá escoar durante a deformação, afetando também a distribuições de tensões e temperaturas ao longo da peça na conformação.

Vale lembrar que nem sempre é desejado um atrito interfacial mínimo, em processos como laminação, extrusão, forjamento e estampagem, o atrito é utilizado para alcançar a geometria e as propriedades do produto final desejado.

Logo, em operações de conformação de metais, é necessário quantificar o atrito variando o lubrificante, material da amostra e/ou da ferramenta, sob diversas temperaturas e taxas de deformações. Para então otimizar uma rota de processamento na criação de um produto com as qualidades desejadas, além de ser economicamente favorável.

3.2 Ensaio de compressão de anel

O ensaio de compressão de anel tem mostrado ser uma das melhores formas para quantificar o atrito. Neste ensaio, uma amostra pequena na forma de anel é comprimida entre duas placas rígidas (ferramenta) paralelas.

O diâmetro interno do anel (d) pode instantaneamente aumentar, diminuir ou permanecer constante, dependendo da quantidade de tensão de atrito imposta sobre as ferramentas. Para baixos fatores de atrito (figura 3.1(b)), o diâmetro interno do anel deve aumentar, o anel irá deformar como um disco sólido, ou seja, todos “elementos” do anel fluem radialmente para fora, a uma taxa proporcional à sua distância do centro. Com o aumento do atrito (figura 3.1(c)), o disco passa a deformar para o centro do anel, pois haverá o surgimento de uma região de transição, onde parte do material irá escoar radialmente, no sentido interno do anel e parte do material irá escoar radialmente para fora do anel. Esta região é chamada de superfície neutra (S_n) e está indicada na figura 3.2.

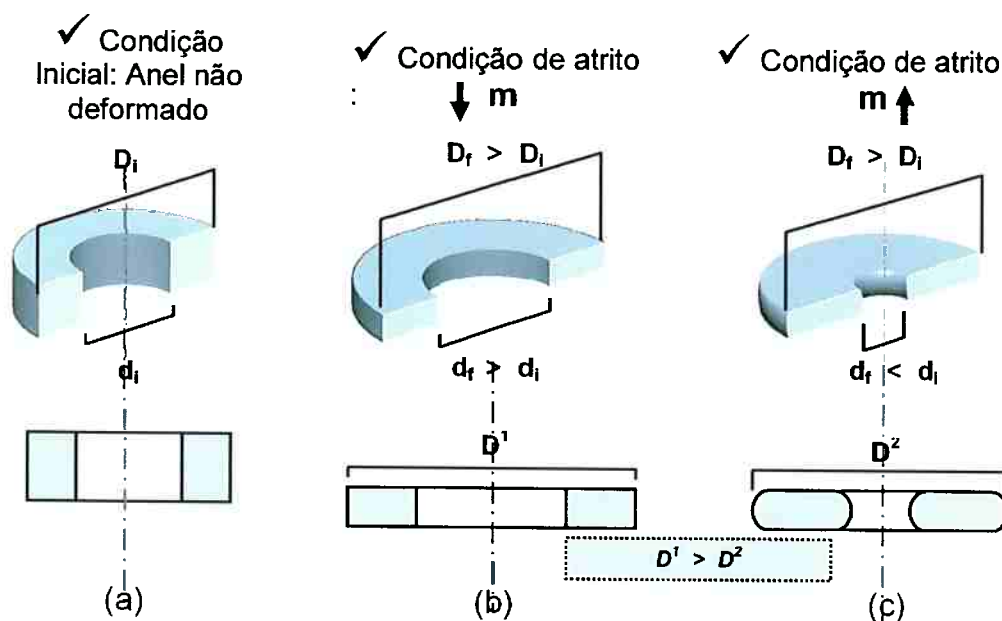


Figura 3. 1: Deformação do anel. (a) Anel não deformado; (b) Anel deformado em condição de atrito baixo ($m < 0,3$ em média para a maioria dos materiais) (c) Anel deformado em condição de atrito alto.

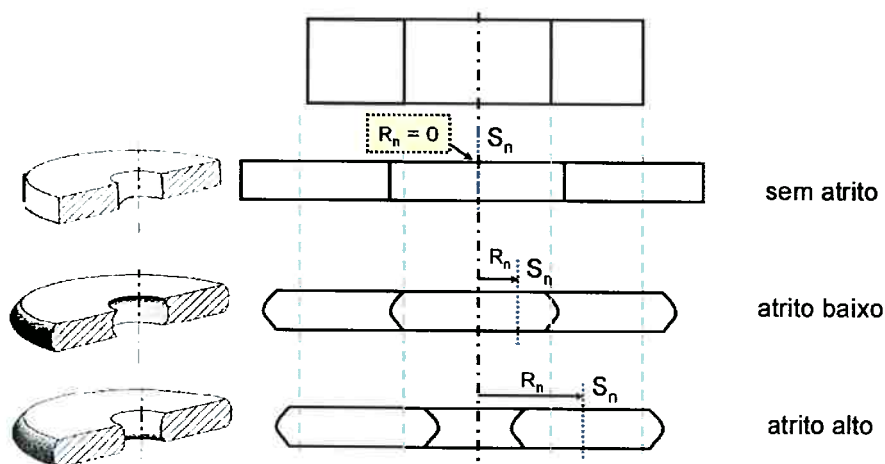


Figura 3. 2: Indicação da superfície neutra (S_n) do anel e do raio neutro (R_n).

O comprimento do centro do anel até a superfície neutra (S_n) é chamado de raio neutro (R_n).

A mudança do diâmetro interno com o atrito promove uma meio sensível para calcular o fator de atrito interfacial, utilizando uma determinada geometria de anel.

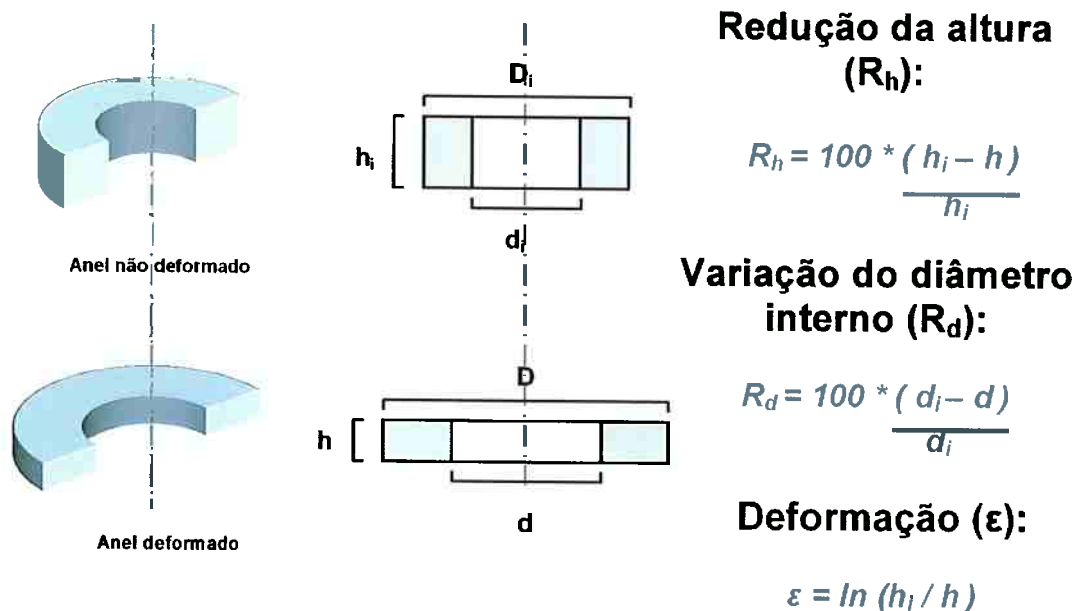


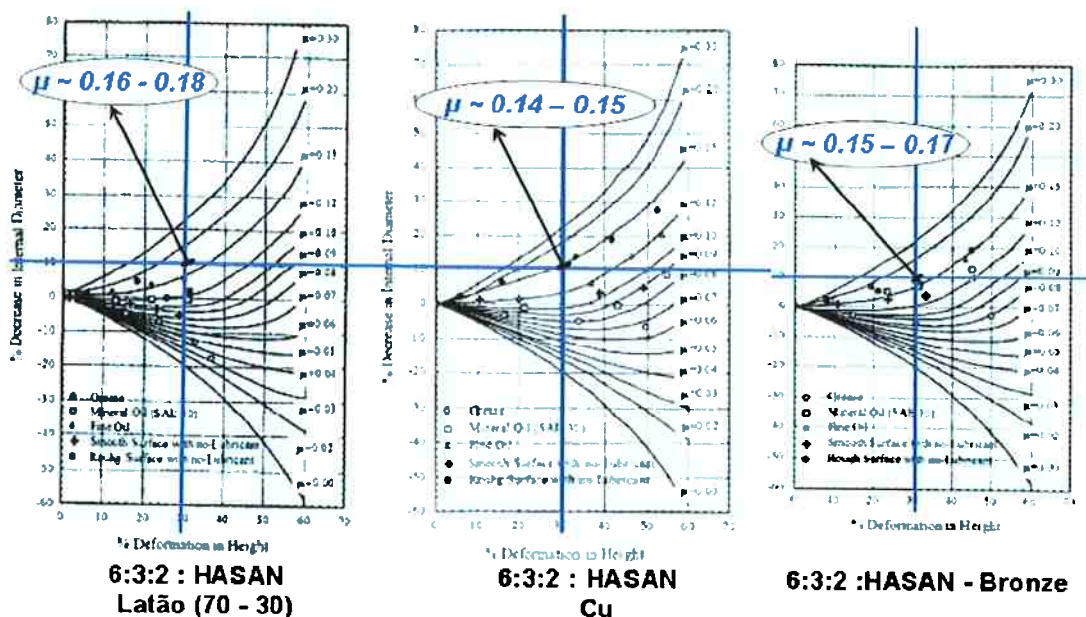
Figura 3. 3: Dimensões do diâmetro interno, diâmetro externo e altura do anel, antes e depois de comprimidos, utilizadas para determinar a redução da altura (R_h), a variação do diâmetro interno (R_d) e a deformação (ϵ).

A maior vantagem deste ensaio utilizando anel para determinação do atrito é envolver somente a medição da variação do diâmetro interno (R_d) com a variação da

altura do anel (R_h), não necessitando de outros parâmetros, como propriedades mecânicas do material. A medição de tais parâmetros representa uma grande dificuldade, especialmente quando realizado em elevadas temperaturas ou altas taxas de deformação. Tendo em mão os valores de R_h e R_d (Figura 3.3), os pontos são plotados em gráficos de curvas de calibração (*próximo item*) e assim é determinado o fator de atrito.

3.3 Curvas de calibração

Baseado na dimensão do anel antes e depois da deformação, a porcentagem da redução na altura (R_h) e a porcentagem da variação do diâmetro interno (R_d) são calculadas e impostas sobre uma apropriada curva de calibração, para obter o fator de atrito. Estas curvas de calibração variam de material para material (Figura 3.4) e geometria do anel (Figura 3.6).



·Sofuoğlu, H. (**HASAN**), Gedikli, H., Rasty, J., ASME, J. Eng. Master. Technol., 123, pp. 338 -348.

Figura 3. 4: Comparação das curvas de calibração para determinação do fator de atrito entre materiais diferentes. [5] (OBS.: $m \sim \sqrt{3} \mu$)

Para construção das curvas de calibração, suposições foram feitas nos cálculos que não podem ser válidos para uma situação real.

As curvas são baseadas em fatores de atrito constantes. Na prática o atrito pode variar durante o ensaio, muito devido ao comportamento do lubrificante, em alguns casos as curvas experimentais desviam repentinamente das curvas de calibração teóricas durante o ensaio. Nos trabalhos experimentais de Male e Cockcroft [3] afirmam que pode ocorrer variação no coeficiente de atrito durante a deformação, logo este irá alterar diretamente a curva de calibração.

3.4 Geometria do anel

A geometria do anel é representada por três números, separados por dois pontos, significando a proporção inicial entre o diâmetro externo (D_o), diâmetro interno (d_o) e altura (h_o), nesta ordem.

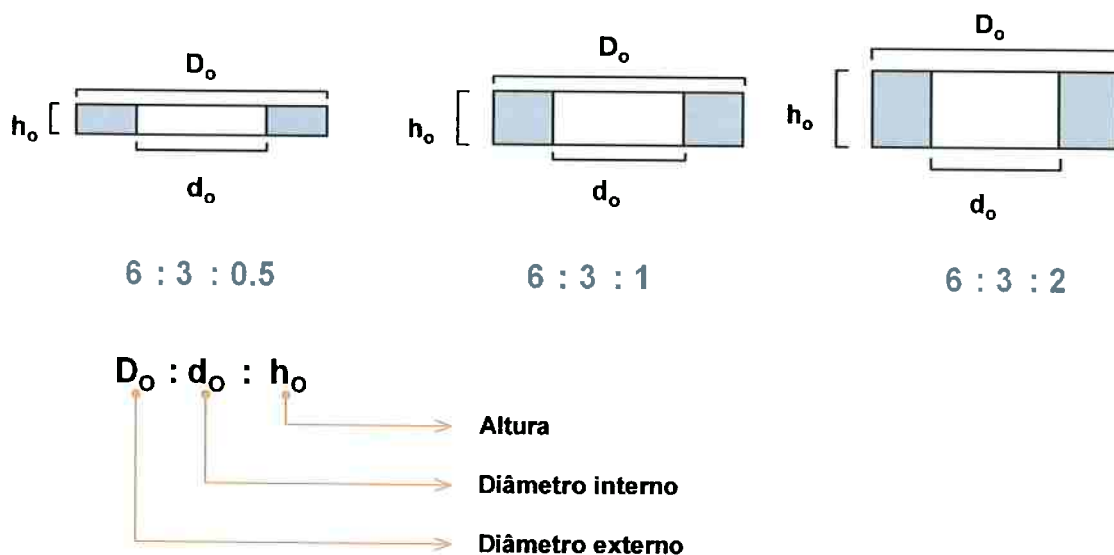
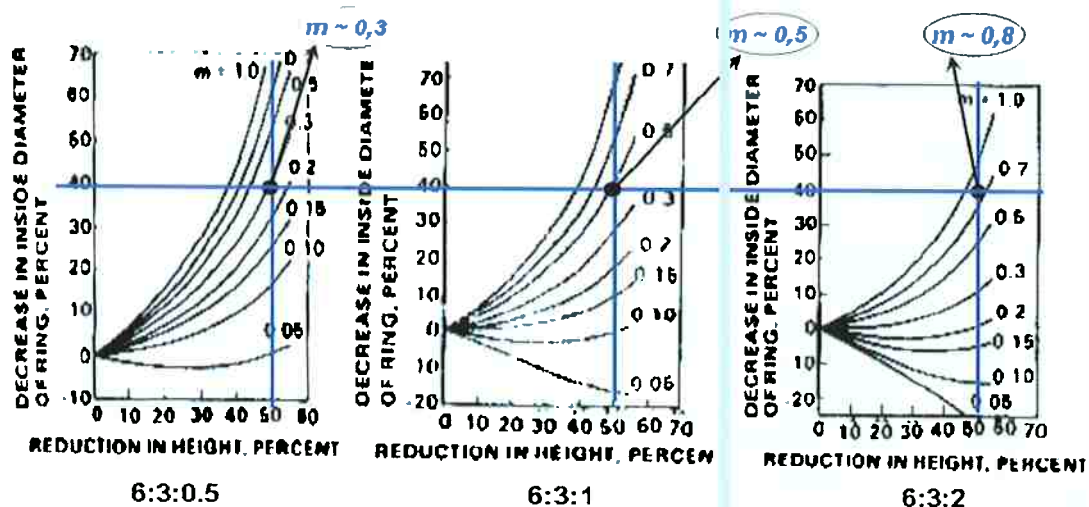


Figura 3. 5: Proporções mais utilizadas na geometria de anel em ensaios de compressão de anel.

A geometria do anel influencia diretamente as curvas de calibração. Como mostra a figura abaixo:



(Referência: [Alpay, T.](#) - *Metal forming: Fundamentals and Applications*. Capítulo 6 – Friction In Metal Forming)

Figura 3. 6: Variação das curvas de calibração para fator de atrito com a geometria do anel. [6]

Uma geometria que possui uma proporção de altura baixa, durante a deformação o campo de tensões irá distribuir mais uniformemente, aproximando das condições impostas pelo critério de Von Mises, porém, devido à baixa altura será necessária uma carga maior para ocorrer à deformação, pois conseqüentemente teremos uma maior superfície de contato (comparado a geometrias de maior proporção de altura numa mesma deformação) durante o ensaio, provocando o aquecimento na região de interface, o que poderá alterar os resultados principalmente em ensaios realizados a elevadas temperaturas.

Vários autores que discutiram o assunto “ensaio de compressão de anel” geralmente apresentam os seus resultados na forma de curvas de calibração para específicas geometrias de anel. A geometria 6:3:2 (diâmetro externo: diâmetro interno: altura) usada por Male e Cockcroft [3] para obtenção das curvas de calibração experimental parecer ser a mais popular e comumente usada.

3.5 Curvas de pressão média relativa no ensaio de compressão de anel

Para determinar a tensão de escoamento do material pelo ensaio de compressão de anel, foram criadas as curvas de pressão média relativa, representadas esquematicamente na figura 3.7.

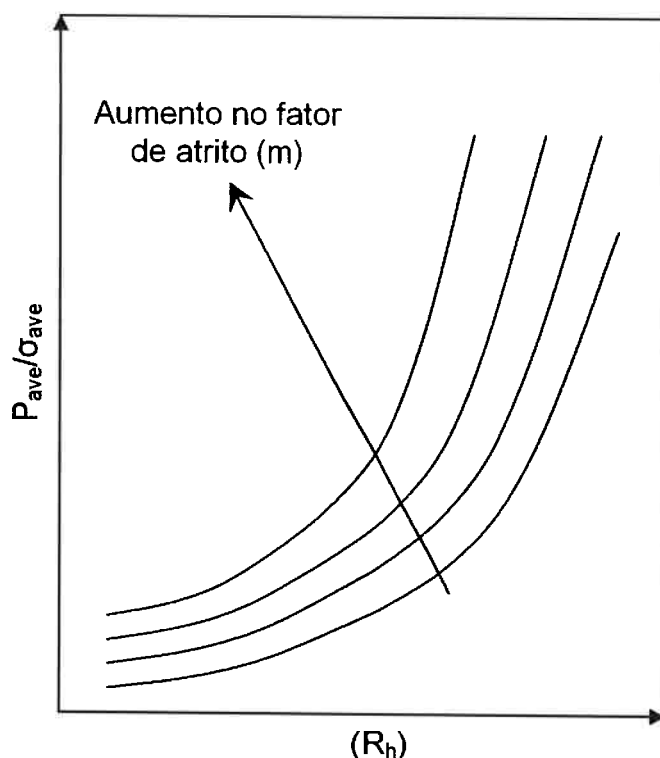


Figura 3. 7: Representação da influência do fator de atrito nas curvas de Pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) versus Redução em altura (R_h).

Através destas, tendo em mãos o fator de atrito, que é determinado pelas curvas de calibração por gráficos como os das figuras 3.4 ou 3.6, demonstradas anteriormente, e a redução da altura (R_h), encontramos o valor equivalente da pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}), que é igual à pressão média do equipamento (P_{ave}) dividido pela tensão média de escoamento do material (σ_{ave}). Se o equipamento registrar a carga aplicada (P), variando com a deformação durante o ensaio, divide-se pela área de contato de interface peça-ferramenta (A), correspondente à mesma deformação, podemos obter a pressão média (P_{ave}^*) instantânea:

$$P_{ave}^* = \frac{P}{A} = \frac{\text{Carga instantânea}}{\text{Área instantânea}}$$

E assim é possível encontrar a tensão de escoamento do material (σ_{ave}), para uma dada deformação por:

$$\sigma_{ave} = \frac{P_{ave}^*}{P_{ave}/\sigma_{ave}}$$

Note que, com o aumento da redução de altura (R_h), na figura 3.7, a pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) aumenta drasticamente quanto maior for o fator de atrito.

3.6 Influencia da temperatura no ensaio de compressão de anel

Quando o material é conformado em elevadas temperaturas, devemos levar em consideração alguns fatores que não influenciavam na temperatura ambiente, como:

a) Taxa de deformação e temperatura

A taxa de deformação e a temperatura são parâmetros que agem conjuntamente em elevadas temperaturas.

Os fenômenos como recristalização estática / dinâmica e recuperação estática / dinâmica dependem da EDE (energia de defeito de empilhamento) do material, da temperatura de trabalho e a taxa de deformação aplicada pelo equipamento, podendo ser notado o seu efeito em curvas de escoamento do material.

b) Formação de filme de óxidos na interface de contato

A formação de filmes de óxidos produzidos na interface ferramenta-peça altera o atrito, algumas vezes esse filme de óxidos possui boas propriedades lubrificantes, porém, não existe uma concordância geral sobre o assunto.

3.7 Resumo Histórico

As referencias abaixo analisadas estão associadas ao artigo de K. P. Rao e K. Sivaram [2], em seu trabalho fez uma comparação entre os resultados de vários autores, utilizando o ensaio de compressão de anel.

O ensaio de compressão de anel foi introduzido por Kunogi, e desenvolvido por Male e Cockcroft, que são os pioneiros nos ensaios experimentais, seus esforços serviram de base para análises de cilindros forjados, por Schroeder e Webster e para análises matemáticas do ensaio de compressão de anel, realizadas por Kunogi, Kudo, Avitzur Hawkyard e Johnson e Burgdorf. Os estudos das curvas de escoamento foram realizadas por Avitzur, Saul et al, Bramley e Abdul, Depierre e Gurney e Altan et al. Existem autores que realizaram o ensaio utilizando materiais porosos. Geralmente, os resultados das análises teórica e dos trabalhos experimentais estão presentes na forma de curvas de calibração, para geometrias específicas de anel.

Um resumo dos experimentos realizados ao longo dos anos sobre o ensaio de compressão de anel é apresentado na tabela abaixo:

| Ano | Autor | Tipo de material testado | Método do teste empregado | Taxa de deformação (s^{-1}) | Fator de Atrito medido | Teoria utilizada para estimar o fator de atrito | Deformação máxima |
|------|---------------------|-----------------------------|---|---------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------|
| 1963 | Pearsell e Backoven | Alumínio | Pinos de pressão em regime quase estático. | 10^{-3} | $m > 0,18$ | Não especificado | 50 |
| 1970 | Male e DePierre | Aço doce | Ensaio de compressão de anel em regime quase estático | 50 | $m = 0,4-0,5$ | Schroeder e Avitzur | 40 |
| 1970 | Male e DePierre | Alumínio (sem lubrificante) | Ensaio de compressão de anel em regime quase estático | 50 | $m = 0,4-0,5$ | Schroeder e Avitzur | 40 |
| 1970 | Male e DePierre | Alumínio (graxa) | Ensaio de compressão de anel em regime quase estático | 50 | $m = 0,06-0,1$ | Avitzur | 60 |
| 1970 | Male e DePierre | Cera | Ensaio de compressão de anel em regime quase estático | 50 | $m = 0,02-0,14$ | Avitzur | 50 |
| 1984 | Gorham et al. | Alumínio | Ensaio de compressão de anel | 10^5 | $m = 0,04-0,09$ | Avitzur | 35 |
| 1993 | Hwu et al. | Aço doce | Ensaio de compressão de anel em regime quase estático | $0,01 - 1$ | $m = 0,06$ | Avitzur, incluindo o embarrigamento | 60 |
| 1996 | Rudkins et al. | Aço (elevadas temperaturas) | Ensaio de compressão de anel | Quase estático | $m \sim 1,2$ | Avitzur e trabalho numérico | 50 |
| 1997 | Walley et al. | Aço RHA | Ensaio de compressão de anel | 10^4 | $M = 0,18$ | Lee e Altan | 50 |
| 2003 | Rao e Sivaram | Alumínio | Ensaio de compressão de anel | Não especificado | $m = 0,07-0,08$ $m = 0,1-0,15$ | Não fez estimativas | 50 |

Tabela 3.1: Alguns trabalhos sobre o ensaio de compressão em ordem cronológica (tabela retirada da ref [10]).

3.8 QForm2D/3D

É um software de interface gráfica que pode ser executado sobre plataforma Windows 95, 98, Me, NT, 2000 e XP, baseado em um sistema de elementos finitos que é utilizado para simular processos de conformação de materiais. Possui um editor (QDraft) para construir a geometria do material e do ferramental. Na simulação é possível determinar as características da prensa que será utilizada, do lubrificante escolhido na simulação e dos materiais adotados na peça e na ferramenta, tudo em bancos de dados disponível no software ou criado pelo usuário. Pode realizar simulações em quaisquer temperaturas, basta ter informações suficientes em seu banco de dados. Depois de inserido os dados de entrada e compilado, fornece variando com a deformação da peça, o perfil:

- Do contorno;
- Das deformações;
- Das temperaturas;
- Da taxa de deformação;
- Da velocidade em relação ao eixo X e Y.

É possível gerar gráficos, por exemplo, da carga, da energia, da velocidade em função do tempo ou da distância (entre as ferramentas).

A principal vantagem do QForm é a interface simples e intuitiva.

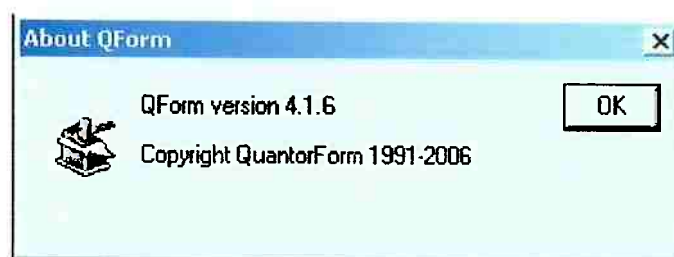


Figura 3. 8: Janela sobre do programa QForm

4. Trabalho utilizado para comparar com elementos finitos

O trabalho adotado para servir de base e comparação com os resultados obtidos por elementos finitos tem autoria de Yhu-Jew Hwu, Chwan-Tzong Hsu e Fengyin Wang, chamado de: “*Measurement of friction and the flow stress of steels at room and elevated temperatures by ring-compression tests*” [1], o propósito deste é determinar o fator de atrito e a tensão de escoamento na temperatura ambiente e em elevadas temperaturas através do ensaio de compressão de anel. O experimento pode ser dividido em duas etapas:

- Análise a temperatura ambiente;
- Análise a elevadas temperaturas.

Um resumo deste artigo é descrito abaixo.

4.1 Análise a temperatura ambiente

O autor realizou experimentos a temperatura ambiente utilizando dois lubrificantes diferentes em dois tipos de carregamento sob diversas taxas de deformação variando a ordem de grandeza.

Os 2 tipos de carregamento são:

- Tipo I: O anel foi comprimido em vários passos, em cada passo retirou-se a peça do equipamento, fez o re-polimento e re-lubrificação para em seguida retornar ao equipamento.
- Tipo II: Os anéis foram comprimidos em um único passo em diferentes deformações.

A composição química do material utilizado (aço) à temperatura ambiente é dada abaixo:

| | Composição Química (%) | | | | | |
|------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | C | Si | Mn | P | S | Al |
| Material A | 0,009 | 0,010 | 0,130 | 0,011 | 0,008 | 0,027 |

Tabela 4.1: Material utilizado a temperatura ambiente [1]

A tabela dos experimentos é dada a seguir:

| nº teste | lubrificante | Tipo de Carregamento | ε (s ⁻¹) | Temperatura (°C) |
|----------|------------------|----------------------|----------------------------------|------------------|
| 1 | Teflon | I | 0,01 | 20 |
| 2 | | | 0,10 | |
| 3 | | | 1,00 | |
| 4 | | III | 0,01 | |
| 5 | | II | 0,10 | |
| 6 | | III | 1,00 | |
| 7 | Sem lubrificante | I | 0,10 | |
| 8 | | I | 1,00 | |

Tabela 4.2: Experimentos realizados pelos autores Yhu-Jew-Hwu et al na temperatura ambiente [1]

O fator de atrito foi determinado pelas curvas de calibração, abaixo na figura 4.1 é apresentado as curvas de calibração para um anel de aço de geometria 6:3:2 determinado por Y. J. Hwu et al. [1]

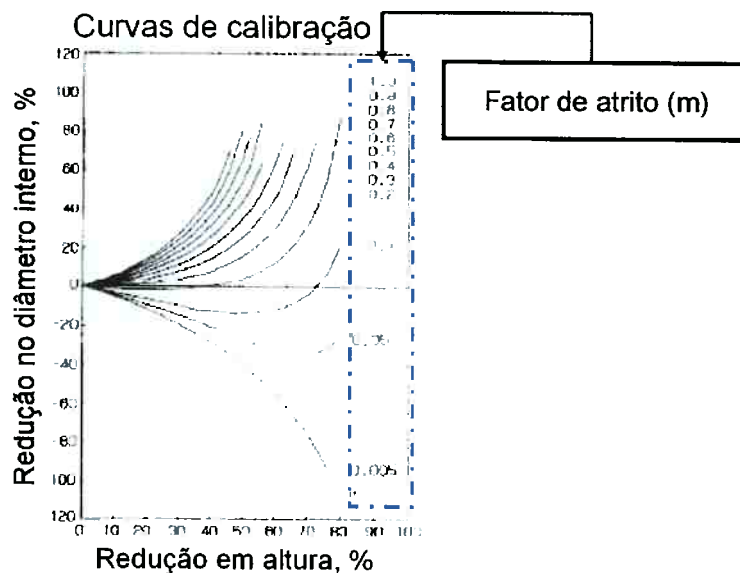


Figura 4. 1: Curvas de calibração para fator de atrito interfacial em anel de geometria 6:3:2.

Yhu-JenHwu em seus ensaios, pelas curvas de calibração da figura 4.1, medindo a variação do diâmetro interno (R_d) e a variação da altura dos anéis (R_h) , encontrou

um fator de atrito (μ) para o teflon entre 0,05 e 0,1, figura 4.2. Essa variação é justificada, pois nas maiores taxas de deformação o filme de teflon não acompanha a deformação do anel suficientemente para cobrir a superfície de contato, isso é comprovado pela formação de bandas brilhantes formadas no anel e na superfície do equipamento, causadas pelo contato metal-metal.

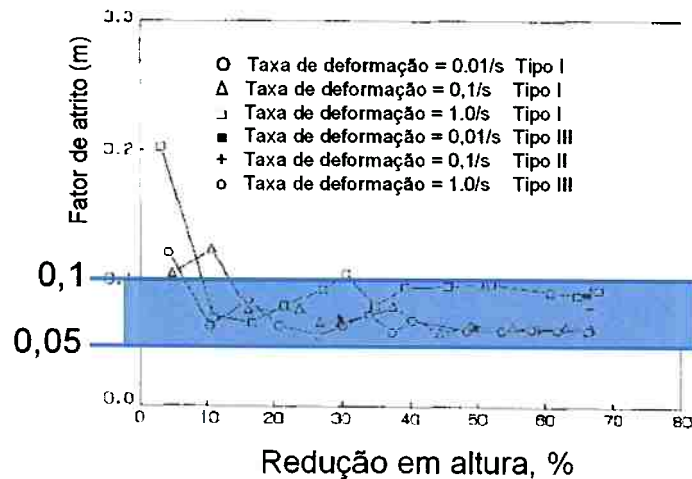


Figura 4. 2:Variação do fator de atrito do lubrificante teflon em função da redução em altura em diversas taxas de deformação e tipos de carregamento. [1]

Os valores do fator de atrito (μ) versus a taxa de deformação, sem a utilização de lubrificante são representadas abaixo:

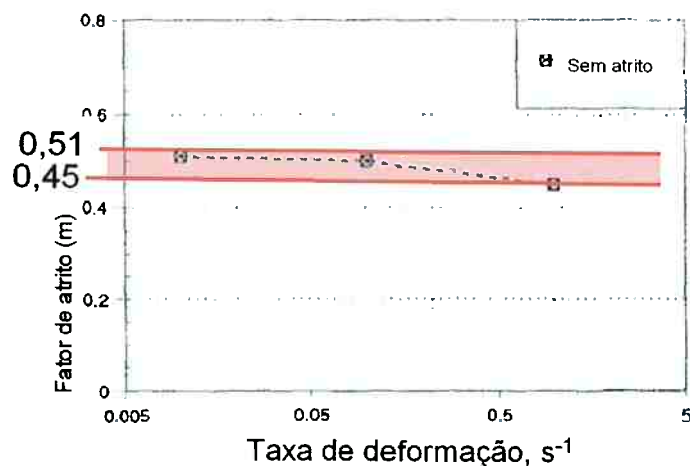


Figura 4. 3: Variação do fator de atrito para o ensaio sem a utilização de lubrificante.

Segundo o autor, nos ensaios sem a utilização de lubrificantes, o fator de atrito não apresenta aparentemente uma dependência com a taxa de deformação.

Determinado o fator de atrito, pelas curvas da figura 4.1, é possível pela figura 4.4 encontrar a pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) para cada redução em altura (R_h)

correspondente. Estas curvas foram criadas por Y. J. Hwu et al. empregando os conceitos de Avitzur

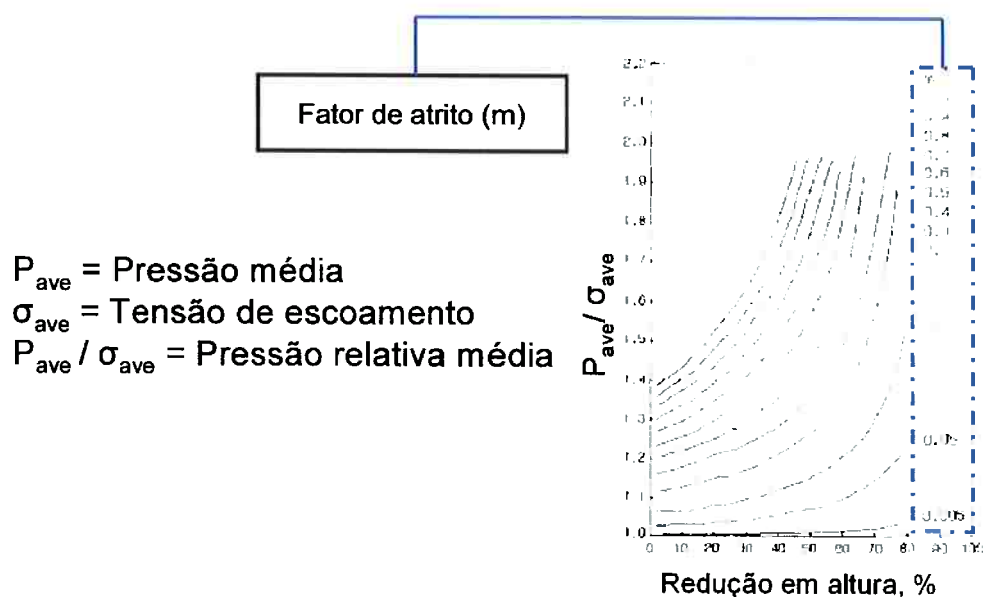


Figura 4. 4: Curvas de pressão média relativa em anel de aço, para uma geometria 6:3:2.

A pressão média (P_{ave}) pode ser determinada pela carga aplicada (P) do equipamento dividido pela área de contato (A) entre a superfície do anel e a superfície de contato da ferramenta. Assim, tendo em mãos a pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) e a pressão média (P_{ave}), pode ser efetuado o cálculo da tensão de escoamento média (σ_{ave}).

As curvas da pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}), da pressão média (P_{ave}) e da tensão de escoamento média (σ_{ave}) versus a deformação (ϵ), obtidas utilizando o lubrificante teflon e sem a utilização de lubrificante são demonstrados nas figuras 4.5 e 4.6, respectivamente.

Note que utilizando como lubrificante o filme de teflon, que possui baixo fator de atrito (μ), com um valor médio de 0,07, a pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) é baixa, logo a diferença entre a pressão média (P_{ave}) e a tensão de escoamento (σ_{ave}) é pequena. Em contraste, sem a utilização de lubrificante, que possui um fator de atrito (μ) da ordem de 0,5, a pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) aumenta significativamente pois apresenta um maior atrito superficial.

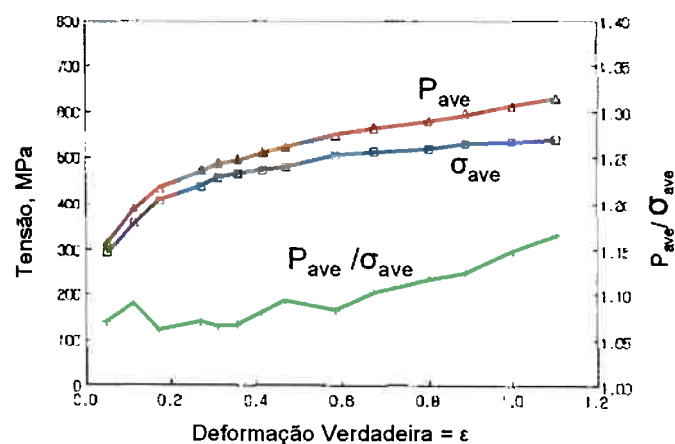


Figura 4. 5: Pressão média (P_{ave}), tensão de escoamento (σ_{ave}) e pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}), quando o filme de teflon é utilizado como lubrificante. [1]

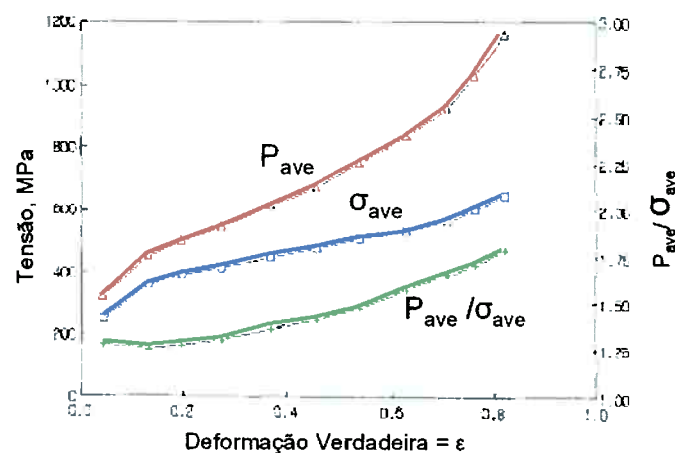
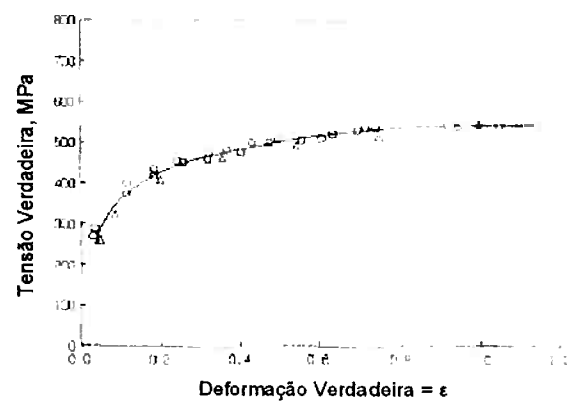


Figura 4. 6: Pressão média (P_{ave}), tensão de escoamento média (σ_{ave}) e pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}), sem a utilização de lubrificante. [1]

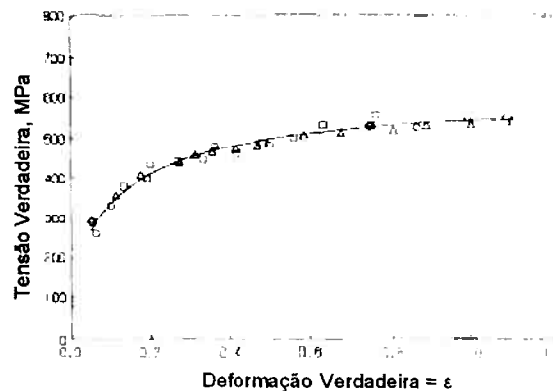
As curvas de tensão de escoamento média (σ_{ave}) obtidas para as duas condições de lubrificação, na temperatura ambiente, não possuem essencialmente nenhuma diferença, como mostra na figura 4.7. Isto é um indicativo, segundo Y. J. Hwu et al, que o método adotado para determinar a tensão de escoamento do material é apropriado. Além disso, nos ensaios realizados em diferentes tipos de carregamento (entre o tipo I e o tipo II), as curvas de tensão de escoamento resultantes também não apresentaram diferenças significativas, como mostra na Figura 4.8. Também é importante informar, que o autor, não encontrou influência da taxa de deformação na determinação da tensão de escoamento, na temperatura ambiente.



△ Teflon , carregamento tipo I

□ A seco , carregamento tipo I

Figura 4.7: Curva tensão verdadeira - deformação verdadeira obtida no carregamento tipo I, para as duas condições de lubrificação[1]



△ Teflon , carregamento tipo I

□ A seco , carregamento tipo I

Figura 4.8: Curva tensão verdadeira - deformação verdadeira obtida nos carregamentos tipo I e II. [1]

4.2 Análise a elevadas temperaturas

Em elevadas temperaturas Y. J. Hwu et al. utilizou outro material (aço) com a composição química, abaixo:

| | Composição Química (%) | | | | | |
|------------|------------------------|-------|-------|-------|-------|----|
| | C | Si | Mn | P | S | Al |
| Material B | 0,045 | 0,010 | 0,200 | 0,016 | 0,013 | - |

Tabela 4.3: Material utilizado em elevadas temperaturas[1]

| nº teste | lubrificante | Tipo de Carregamento | $\epsilon \text{ (s}^{-1}\text{)}$ | Temperatura (°C) |
|----------|-----------------|----------------------|------------------------------------|------------------|
| 1 | Nitreto de Boro | III | 0,01 | 1000 |
| 2 | | | 0,10 | |
| 3 | | | 1,00 | |
| 4 | | | 10,0 | 900 |
| 5 | | | | 950 |
| 6 | | | | 1050 |
| 7 | | | | |

Tabela 4.4: Experimentos realizados por Yhu-Jew-Hwu et al, em elevadas temperaturas [1]

O carregamento utilizado foi do tipo III, na qual o anel é forjado até a altura final em um único passo. O carregamento do tipo I em elevadas temperaturas é inviável, pois as propriedades do material mudam continuamente durante a deformação causada pela recuperação e recristalização.

Foi utilizado como lubrificante o nitreto de boro cujo fator de atrito encontrado pelas curvas de calibração da figura 4.1 (a mesma utilizada na temperatura ambiente) variou entre 0,5-0,65 e não demonstrou qualquer dependência com a temperatura ou com a taxa de deformação.

O procedimento adotado em elevadas temperaturas foi:

- As amostras foram deformadas em um único passo até a redução final.
- O fator de atrito foi determinado pelas curvas de calibração, através das medições finais.
- O fator de atrito foi considera constante durante a deformação.
- A curva de escoamento foi levantada considerando, a carga aplicada, o fator de atrito, a deformação sofrida e as dimensões iniciais da amostra.

O efeito da taxa de deformação sobre o material na temperatura de 1000°C é apresentado na figura 4.9, que representa bem o comportamento da deformação de metais sob elevadas temperaturas. No estágio inicial de deformação há o acúmulo

de discordâncias na peça devido ao carregamento, recuperação e recristalização dinâmica indicam picos de tensão, e em seguida, uma região de estado estacionário onde o encruamento e a recuperação/recristalização são balanceados.

Na figura 4.10, temos as curvas obtidas à taxa de deformação de 10s^{-1} . Quanto maior a temperatura, menor o limite de resistência do material.

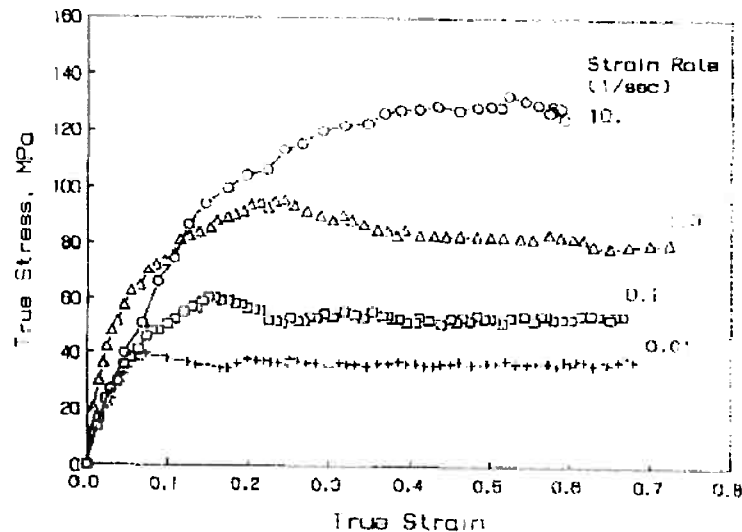


Figura 4. 9: Efeito da taxa de deformação sobre a tensão de escoamento na temperatura de 1000°C.

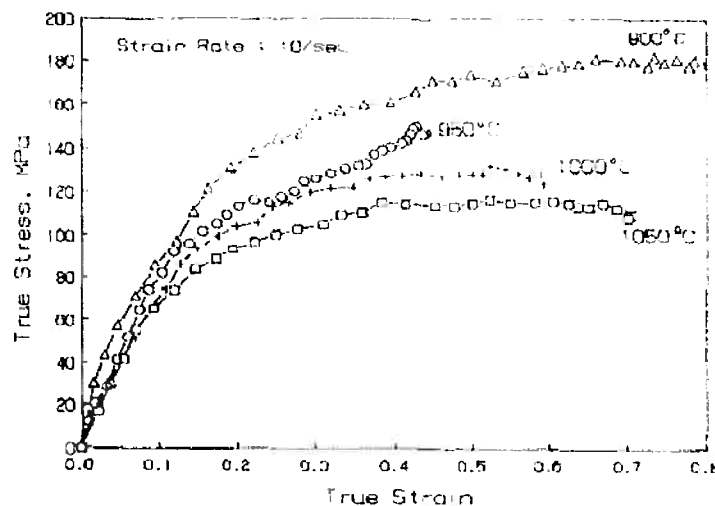


Figura 4. 10: Efeito da temperatura sobre a tensão de escoamento na taxa de deformação de 10s^{-1} .

Por estes resultados, comprova que o ensaio de compressão de anel é sensível à mudança na taxa de deformação e temperatura.

O autor afirma que a comparação direta dos resultados com outros autores é dificultosa, quase impossível encontrar resultados publicados utilizando o mesmo material nas mesmas condições de ensaio. O modo de deformação, o tratamento térmico das amostras preparadas, os métodos de lubrificação, geometria da amostra, o método para determinar a tensão de escoamento. Considerando essas limitações, o autor compara a sua curva de escoamento com as encontradas no trabalho realizado por CANMET que realizou ensaio por “cam plastometer”.

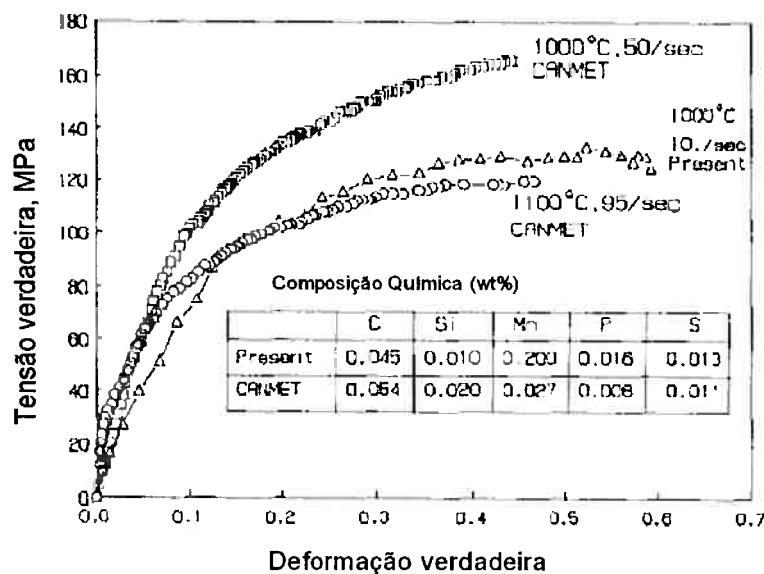


Figura 4. 11: Comparação da tensão de escoamento obtida no ensaio de compressão de anel e o obtido por CANMET.

De acordo com o autor, a ocorrência de oxidação dificultou a análise, o que ocasionou condições de atrito menos dependente dos parâmetros do processo.

Y. J. Hwu et al. ainda fornece os cálculos, empregando os conceitos de Avitzur. Primeiramente é demonstrado, no item 4.3, o cálculo para determinar a pressão média e em seguida, no item 4.4, o cálculo para determinar o raio neutro.

4.3 Cálculo da pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave}) determinado por Y. J. Hwu et al (empregando os conceitos de Avitzur).

A análise de Avitzur foi baseada assumindo que o comportamento do material segue o critério de Von Mises, ou seja, durante a deformação do anel, não irá ocorrer deformação elástica ou variação volumétrica. Considerou um valor de atrito

constante para uma combinação entre o material (amostra), o lubrificante e o ferramental.

Avitzur propôs o seguinte campo de velocidades:

$$\dot{U}_R = \frac{b}{4} \frac{\dot{U}}{T} R \left[1 - \left(\frac{R_n}{R} \right)^2 \right] \frac{\exp(-bY/T)}{1 - \exp(-b/2)}$$

$$\dot{U}_Y = - \left(\frac{\dot{U}}{2} \right) \frac{1 - \exp(-bY/T)}{1 - \exp(-b/2)}$$

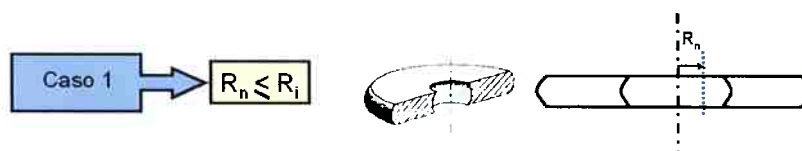
$$\dot{U}_\theta = 0$$

Onde U_R , U_Y , e U_θ são componentes de velocidade na direção radial, axial e angular respectivamente, e U é a velocidade da matéria, T a espessura da amostra, b o parâmetro de abaulamento e R_n é o raio da superfície neutra.

A equação da pressão média relativa determinada por Y. J. Hwu et al., originaram das equações de velocidade acima de Avitzur.

A determinação da pressão média relativa é separada em dois casos:

- $R_n \leq R_i$
- $R_n > R_i$



If $R_n \leq R_i$,

$$p_{ave}/\sigma_0 = f_1(R_i/R_n, R_o/T, R_n/R_n, m, b_1)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\frac{1}{2} \sqrt{3} (R_n/R_o)^2}{1 - (R_i/R_o)^2} \left\{ \sqrt{1 + 3(R_o/R_n)^4} - \sqrt{1 + 3(R_i/R_o)^4 (R_o/R_n)^4} \right. \\ &\quad - \ln \left[(R_i/R_o)^2 \frac{1 + \sqrt{1 + 3(R_o/R_n)^4}}{1 + \sqrt{1 + 3(R_i/R_o)^4 (R_o/R_n)^4}} \right] + \frac{b^2}{4} (R_o/T)^2 \\ &\quad \times \frac{1}{\sqrt{1 + 3(R_o/R_n)^4}} < \frac{1}{4} (R_o/R_n)^4 [1 - (R_i/R_n)^4] - (R_o/R_n)^2 \\ &\quad \times [1 - (R_i/R_o)^2] + \ln(R_o/R_i) > + 2m (R_n/R_o - R_o/T) < \frac{1}{2} (R_n/R_n)^3 \\ &\quad \times [1 - (R_i/R_o)^2] - (R_n/R_n)(1 - R_i/R_o) > (1 - b/4 + b^2/48 - \dots) \left. \right\} \end{aligned}$$



and if $R_n > R_i$,

$$\begin{aligned}
 p_{ave}/\sigma_0 &= f_2(R_i/R_o, R_o/T, R_o/R_n, m, b_2) \\
 &= \frac{\frac{1}{3}\sqrt{3}(R_o/R_n)^2}{1-(R_i/R_o)^2} \left\{ \sqrt{1+3(R_o/R_n)^4} - \sqrt{1+3(R_i/R_o)^4(R_o/R_n)^4} \right. \\
 &\quad - \ln \left[\frac{(R_i/R_o)^2}{1+\sqrt{1+3(R_o/R_n)^4}} \frac{1+\sqrt{1+3(R_o/R_n)^4}}{1+\sqrt{1+3(R_i/R_o)^4(R_o/R_n)^4}} \right] + \frac{b^2}{4}(R_o/T)^2 \\
 &\quad \times \frac{1}{\sqrt{1+3(R_o/R_n)^4}} \left[\frac{1}{4}(R_o/R_n)^4 [1-(R_i/R_o)^4] - (R_o/R_n)^2 \right. \\
 &\quad \times [1-(R_i/R_o)^2] + \ln(R_o/R_i) \Big] + 2m(R_n/R_o - R_o/T) \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{3}(R_o/R_n)^3 \right. \\
 &\quad \times [1+(R_i/R_o)^3] - (R_o/R_n)(1+R_i/R_o) \Big] (1-b_2/4 + b_2^2/48 - \dots) \Big\}
 \end{aligned}$$

O parâmetro de abaulamento (b) é apresentado a seguir:

$$b = \frac{C}{C/6 + D} \quad (R_n \leq R_i)$$

$$b = \frac{E}{E/6 + D} \quad (R_n > R_i)$$

where

$$C = m \left\{ \frac{1}{3}(R_o/R_n)^2 [1-(R_i/R_o)^2] - (1-R_i/R_o) \right\}$$

$$\begin{aligned}
 D &= \frac{R_o/T}{\sqrt{1+3(R_o/R_n)^4}} \left\{ \frac{1}{4}(R_o/R_n)^4 [1-(R_i/R_o)^4] - (R_o/R_n)^2 [1-(R_i/R_o)^2] \right. \\
 &\quad \left. + \ln(R_i/R_o) \right\}
 \end{aligned}$$

and

$$E = m(R_o/R_n) \left\{ \frac{1}{3} + \frac{1}{3}(R_o/R_n)^3 [1+(R_i/R_o)^3] - (R_o/R_n)(1+R_i/R_o) \right\}$$

Note que a pressão média relativa é função de R_n , R_o , R_i , T , m .

Exceto por R_n , todas as outras variáveis podem ser medidas experimentalmente.

$$P_{ave}/\sigma_{ave} = F(R_n, R_o, R_i, T, m)$$

O modo de como é determinado o raio neutra (R_n) será visto no próximo item.

Os valores de P_{ave}/σ_{ave} podem ser representados em gráficos como o determinado por Y. J. Hwu et al na figura 4.4.

4.4 Cálculo do raio neutro (R_n) determinado por Y. J. Hwu et al (empregando os conceitos de Avitzur)..

No item anterior, temos:

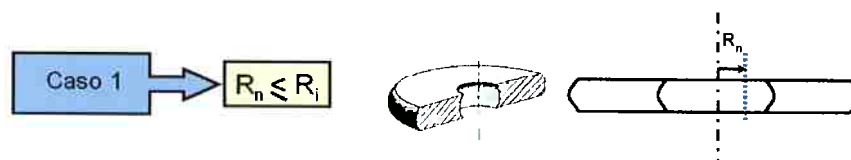
$$P_{ave}/\sigma_{ave} = F(R_n, R_o, R_i, T, m).$$

O valor do raio neutro (R_n), segundo Y. J. Hwu et al, deve ser tal que minimize a pressão média relativa para um valor mínimo:

$$\frac{\partial}{\partial R_n}(P_{ave}/\sigma_{ave}) = \begin{cases} \frac{\partial f_1}{\partial R_n} = 0 & \text{if } R_n \leq R_i \\ \frac{\partial f_2}{\partial R_n} = 0 & \text{if } R_n > R_i \end{cases}$$

Logo teremos uma função $G(R_n, R_o, R_i, T, m) = 0$.

Tendo os valores de R_o, R_i, T, m , o valor de R_n corresponde pode ser encontrado.



If $R_n \leq R_i$,

$$\ln \left[(R_o/R_i)^2 \frac{1 + \sqrt{1 + 3(R_i/R_o)^4 (R_o/R_n)^4}}{1 + \sqrt{1 + 3(R_o/R_n)^4}} \right] + \frac{b^2}{4} \frac{(R_o/T)^2}{1 + 3(R_o/R_n)^4} \\ \times \left\{ \ln(R_o/R_i) - \frac{1}{4}(R_o/R_n)^4 [1 - (R_i/R_o)^2] + \frac{3(R_o/R_n)^4 (R_o/T)}{\sqrt{1 + 3(R_o/R_n)^4}} D \right\} \\ - 2m R_o/T (1 - R_i/R_o) (1 - b/4 + b^2/48 - \dots) = 0,$$



and if $R_n > R_i$,

$$\ln \left[(R_o/R_i)^2 \frac{1 + \sqrt{1 + 3(R_i/R_o)^4 (R_o/R_n)^4}}{1 + \sqrt{1 + 3(R_o/R_n)^4}} \right] + \frac{b^2}{4} \frac{(R_o/T)^2}{1 + 3(R_o/R_n)^4} \\ \times \left\{ \ln(R_o/R_i) - \frac{1}{4}(R_o/R_n)^4 [1 - (R_i/R_o)^2] + \frac{3(R_o/R_n)^4 (R_o/T)}{\sqrt{1 + 3(R_o/R_n)^4}} D \right\} \\ - 2m R_o/T (1 + R_i/R_o - 2R_n/R_o) (1 - b/4 + b^2/48 - \dots) = 0,$$

4.5 Considerações sobre o trabalho de Y. J. Hwu et al.

No trabalho de Y. J. Hwu et al demonstrou a possibilidade de determinarmos o fator de atrito e a tensão de escoamento pelo ensaio de compressão de anel a partir da simples medição da geometria do anel e da carga aplicada pelo equipamento durante a conformação. Para isso determinou curvas de calibração e de pressão média relativa empregando os conceitos desenvolvidos por Avitzur. As curvas determinadas são válidas para quaisquer temperaturas. Obteve resultados satisfatórios tanto para temperatura ambiente como para elevadas temperaturas.

Em seu trabalho, em elevadas temperaturas, a determinação da curva de escoamento foi levantada considerando a geometria inicial, um fator de atrito constante, a carga aplicada e a deformação que a amostra sofreu. Porém, o carregamento utilizado foi o do tipo III, ou seja, a amostra foi reduzida até a altura final em um único passo.

Levando isso em conta, consequentemente o fator de atrito foi determinado por um único ponto na curva de calibração (na redução final), e este fator de atrito foi utilizado para determinar a pressão relativa média (na redução final), o restante das pressões médias relativas será valores estimados, assim como a curva de escoamento resultante. Ou seja, a determinação do fator de atrito e da tensão de escoamento realizada pelo autor está muito sujeita a erros.

Além disso, não informou a pressão média ou carga encontrada em seus experimentos em elevadas temperaturas, o que dificultou uma comparação mais aprofundada.

5. Simulação QForm

Neste capítulo será descrito a inclusão dos dados de entrada no QForm, os dados de saída de interesse para posteriormente serem tratados (calculados), tornando possível a comparação com os dados obtidos no método analítico e da literatura. Logo, a divisão deste capítulo será:

- Dados de entrada;
- Condições de contorno;
- Dados de saída;
- Tratamento de dados.

5.1 Dados de entrada

5.1.1 Geometria do anel

A geometria escolhida, 6:3:2, com altura inicial de 6mm, é a mesma da literatura adotada por Y. J. Hwu et al. [1], tanto para a simulação na temperatura ambiente como para a simulação em elevadas temperaturas.

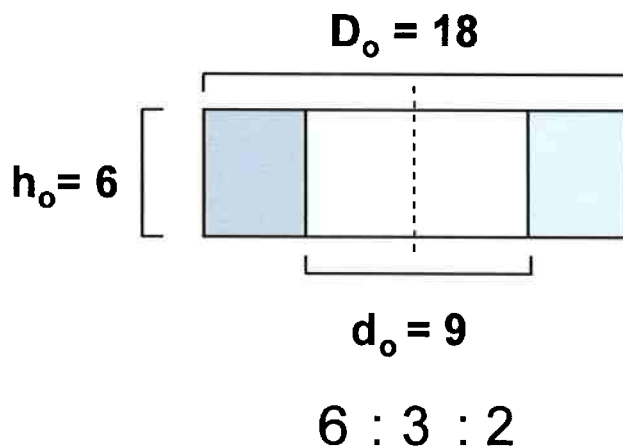


Figura 5. 1: Geometria do anel escolhido para simulação

O aplicativo QDraft que faz parte do software QForm é utilizado para desenhar a peça e a ferramenta de contato (matriz). O layout do desenho inserido no aplicativo é demonstrado abaixo.

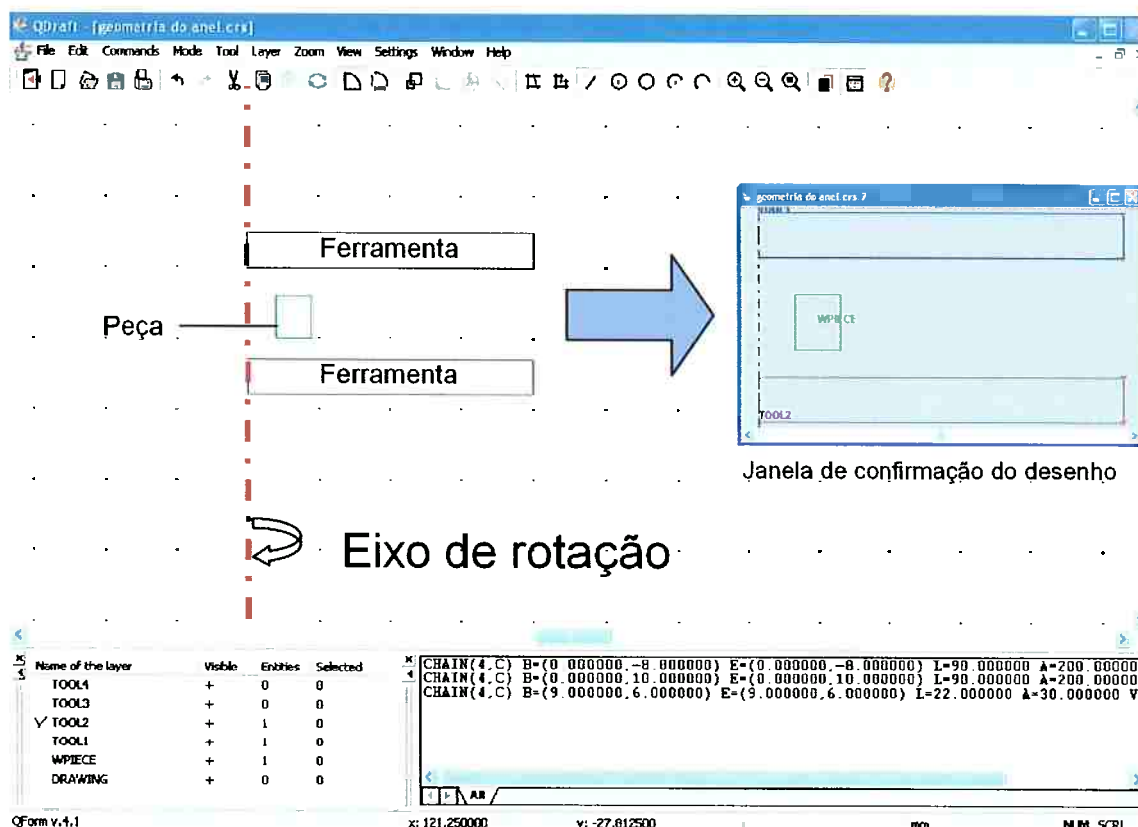


Figura 5. 2: Janela do programa QDraft mostrando o eixo de rotação e o layout da peça e a ferramenta.

5.1.2 Criação do material para a simulação na temperatura ambiente

Ao criar o material CHIA adotado por Yhu-Jen Hwu [1] no QForm, é necessário também informar a curva tensão real versus a deformação real do material nas temperaturas e nas taxas de deformações que serão simuladas. Adotou-se a relação encontrada por ALTAN [6],

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n$$

Para determinar os valores de K e n, os valores foram baseados na curva tensão verdadeira versus deformação verdadeira das figuras 4.7 e 4.8.

Os valores de K e n obtidos foram:

| | Figura 4.7 | Figura 4.8 | Média |
|---|------------|------------|--------|
| K | 585,33 | 581,47 | 583,4 |
| n | 0,2258 | 0,2076 | 0,2167 |

Tabela 5.1: K e n encontrados nas curvas de Y. J. Hwu et al.

Logo, no caso em estudo, os valores utilizados foram:

$$K = 583,4 \text{ MPa}$$

$$n = 0,2167$$

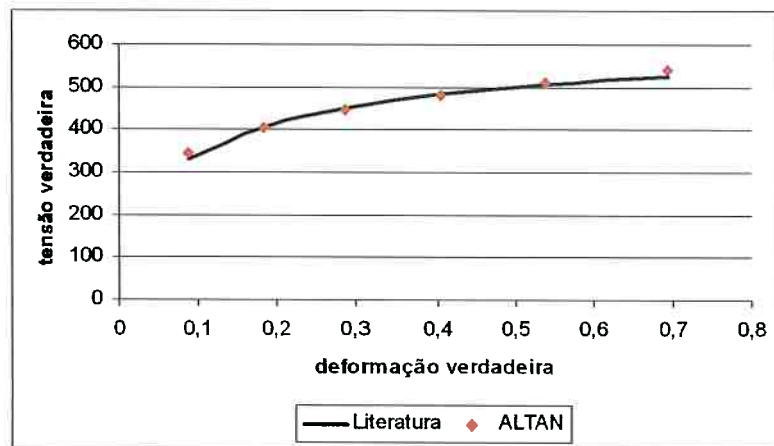


Figura 5. 3: Comparação das curvas de escoamento dada pelo cálculo de ALTAN e encontrada analiticamente por Y. J. Hwu et al. [1]

A curva gerada pelos valores de ALTAN[6] correspondem bem com a encontrada pelo autor da figura 4.7 que tem o mesmo comportamento da figura 4.8. O próprio autor afirma que a curva permanece praticamente constante para todos os lubrificantes adotados e tipos de carregamento. A janela da criação do material está na figura 5.4.

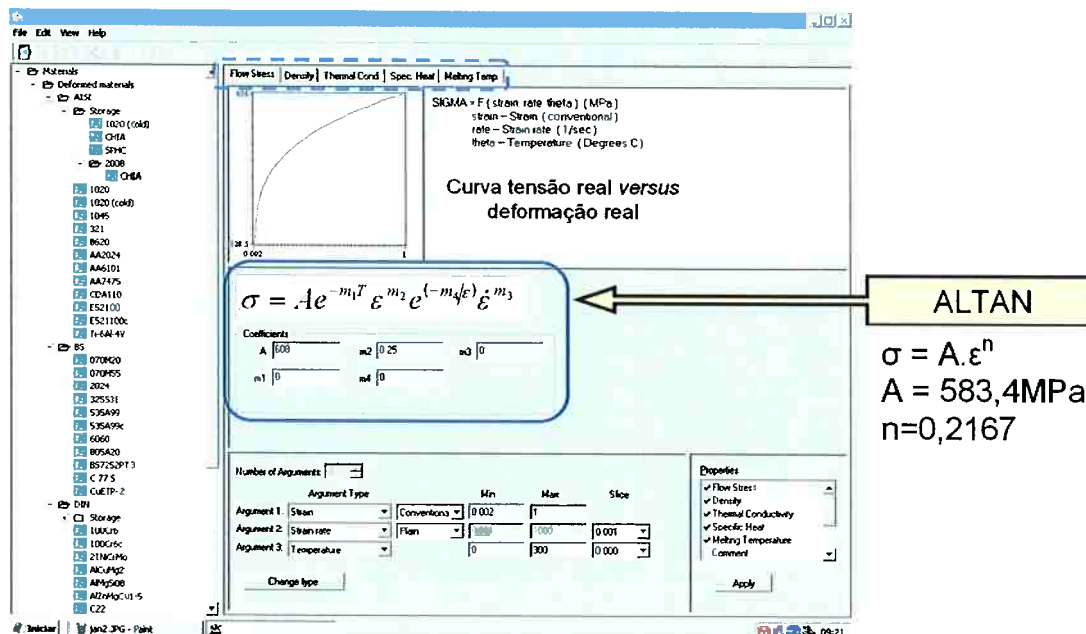


Figura 5. 4: Janela de criação do material para simulação a temperatura ambiente.

5.1.3 Criação do lubrificante para a simulação na temperatura ambiente

Yhu-JenHwu [1] notou que os lubrificante sólido teflon sofre um leve aumento no fator de atrito com o aumento da deformação, enquanto que, sem a utilização de lubrificantes, o fator de atrito varia independente da deformação do material.

Levando em conta que a variação do fator de atrito sem a utilização de lubrificantes e utilizando o lubrificante teflon é menor ou igual a 0,05, foi adotado um valor intermediário para representar esses lubrificantes no QForm, a fim de considerar o fator de atrito constante. Os valores encontrados por Y. J. Hwu et al e os valores respectivos adotados no QForm, estão na tabela abaixo:

| Temperatura ambiente | | |
|----------------------|-------------|-------------------|
| Yhu-Jen Hwu | Teflon: | $0,05 < m < 0,10$ |
| | A seco: | $0,51 < m < 0,45$ |
| QForm | Sem atrito: | $m=0$ |
| | Teflon: | $m=0,07$ |
| | A seco: | $m=0,5$ |

Tabela 5.2: Fatores de atrito da literatura e os adotados no QForm.

Outros fatores de atrito foi utilizado no QFORM afim de levantar as curvas de calibração e curvas de pressão média relativa.

O fator de atrito no Qform é uma característica do lubrificante que será utilizado na interface peça-ferramenta. Basta selecionar um lubrificante do banco de dados ou criar um novo tipo. Além do fator de atrito, podem ser selecionadas outras propriedades do lubrificante como coeficiente de transferência de calor efetiva e coeficiente de transferência de calor verdadeira, a janela da escolha do lubrificante é apresentada abaixo.

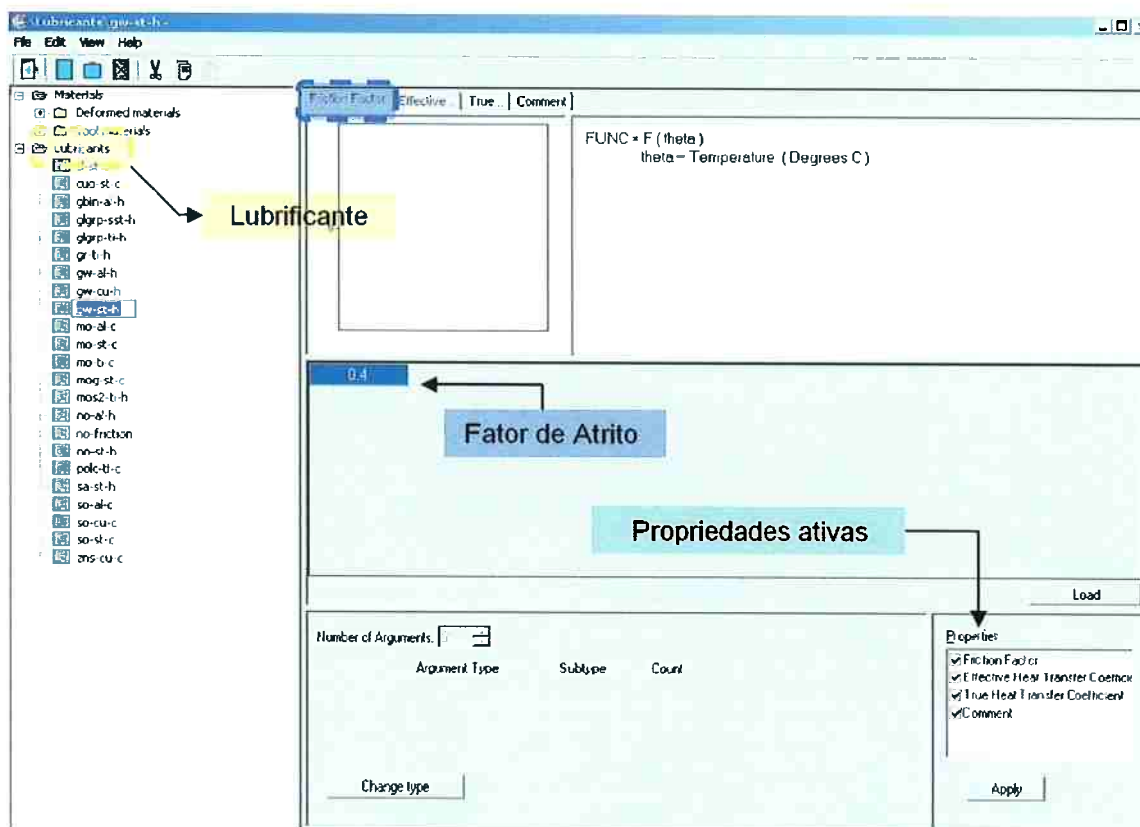


Figura 5. 5: Janela de criação do lubrificante para simulação a temperatura ambiente.

5.1.4 Criação do material para a simulação em elevadas temperaturas

O material utilizado por Yhu-JenHwu [1] nos ensaios a elevadas temperaturas foi o Material B, como esse material será conformado em elevadas temperaturas, no Qform será necessário fornecer as curvas de tensão de escoamento versus a deformação nas elevadas temperaturas sob diversas taxas de deformação.

Os resultados de Yhu-JenHwu [1] forneceram duas figuras da tensão de escoamento versus a deformação. Uma utilizando temperatura igual a 1000°C para diversas taxas de deformação (Figura 4.9) e outra, numa taxa de deformação igual a $10s^{-1}$, variando a temperatura (Figura 4.10).

Baseado nestas figuras, as temperaturas escolhidas para serem inseridas no banco de dados do material foram de 900°C, 950°C, 1000°C e 1050°C e as taxas de deformação escolhidas de $0,01 s^{-1}$, $0,1s^{-1}$, $1s^{-1}$ e $10s^{-1}$. Contudo, as curvas de escoamento nas temperaturas de 900°C, 950°C e 1050°C temos apenas sob taxa de

$$\sigma = 9,8 \cdot \exp[0,126 - 1,75 \cdot C - 0,594 \cdot C^2 + (2851 + 2968 \cdot C - 1120 \cdot C^2)/(T + 273)] \cdot \epsilon^{0,21} \cdot \epsilon^{0,13}$$

$T \rightarrow [^{\circ}\text{C}]$

$\varepsilon \rightarrow$ deformação

$\epsilon \rightarrow$ taxa de deformação

A janela da criação do material é representada abaixo, observe na tabela, onde são inseridos os valores da tensão de escoamento, em função da deformação e taxa de deformação, para uma dada temperatura.

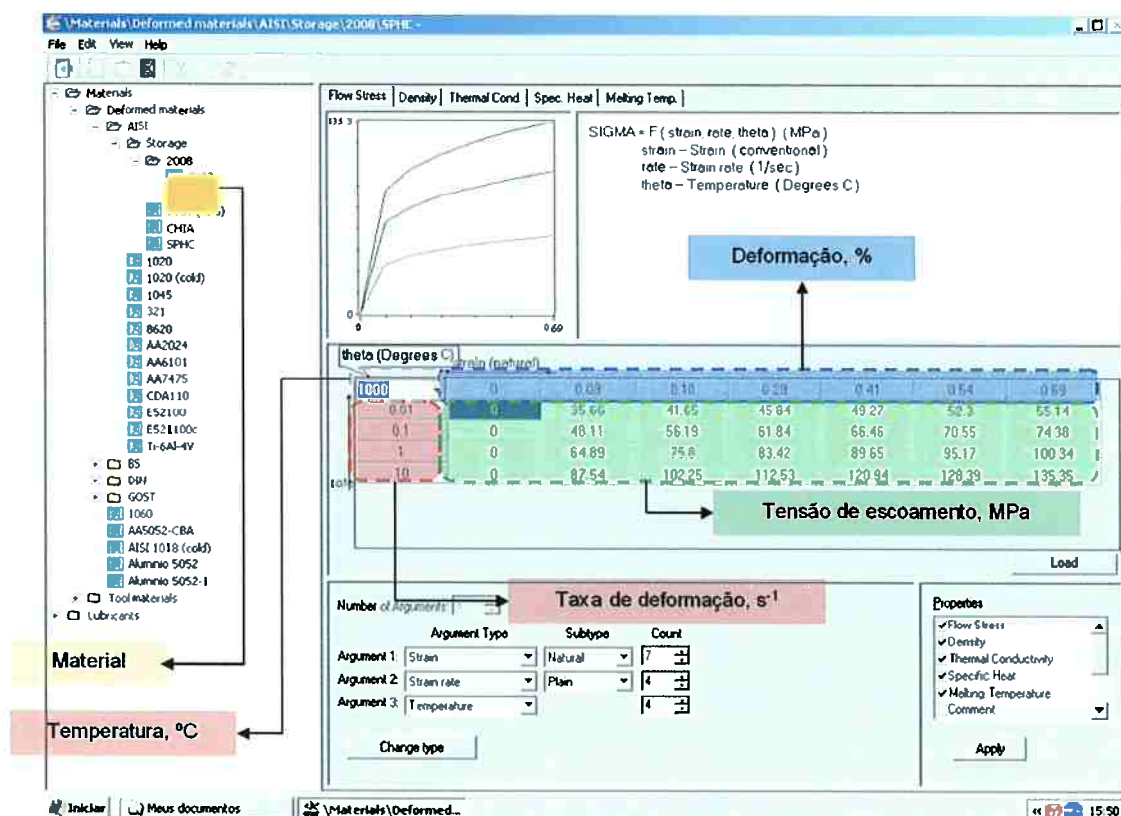


Figura 5. 6: Janela da criação do material para simulação em elevadas temperaturas.

5.1.5 Criação do lubrificante para a simulação em elevadas temperaturas.

O fator de atrito entra nas propriedades do lubrificante, o procedimento para criação do lubrificante é o mesmo que foi visto na criação do lubrificante utilizado na temperatura ambiente.

5.2 Condições de contorno:

O Procedimento em condições de contorno tem os mesmos passos tanto para temperatura ambiente como para elevadas temperaturas. Os passos serão descritos abaixo:

1º Passo (Figura 5.7 (a)):

Primeiramente escolhemos o tipo de processo. O processo escolhido foi conformação utilizando prensa hidráulica, pois assim é possível trabalhar com uma taxa de deformação constante.

2º Passo (Figura 5.7 (b)):

Neste passo, vai refinar o problema em um caso mais particular. Será especificado que a peça (anel) é um sólido de rotação – round workpiece, que a análise da peça envolve problema térmico – thermal problem e que as variáveis do equipamento influência na conformação, por exemplo, a participação do lubrificante (fator de atrito) – simulate the tool.

3º Passo (Figura 5.7 (c)):

O desenho feito no QDraft é selecionado, lembrando que no passo anterior foi especificado que a peça é um sólido de rotação.

4º Passo (Figura 5.7 (d)):

O problema térmico considerado no 2º passo cria a necessidade da declaração de duas variáveis: Resfriamento antes de iniciar o ensaio pelo ar e resfriamento antes de iniciar o ensaio pela ferramenta.

5º Passo (Figura 5.7 (e)):

São definidas as variáveis do processo escolhido no 1º passo, como a velocidade nominal em metros por segundo, a carga máxima do equipamento, entre outros.

6º Passo (Figura 5.7 (f)):

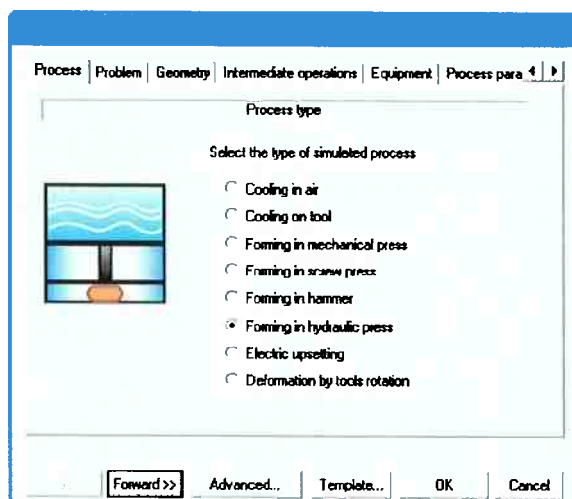
O material do anel é escolhido e a temperatura inicial e uniforme que estará o anel.

7º Passo (Figura 5.7 (g)):

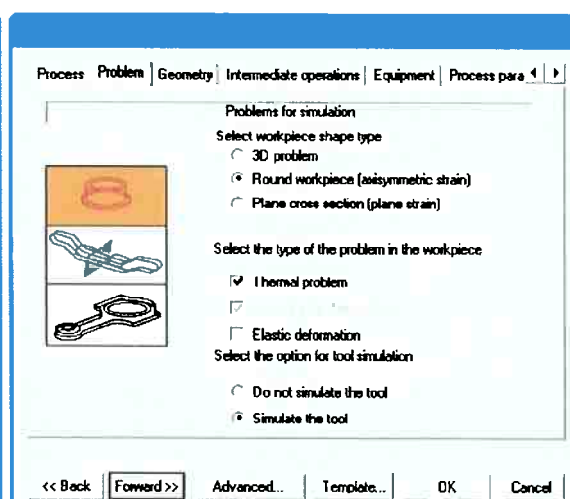
Neste passo o lubrificante é escolhido, e a temperatura inicial da ferramenta.

8º Passo (Figura 5.7 (h)):

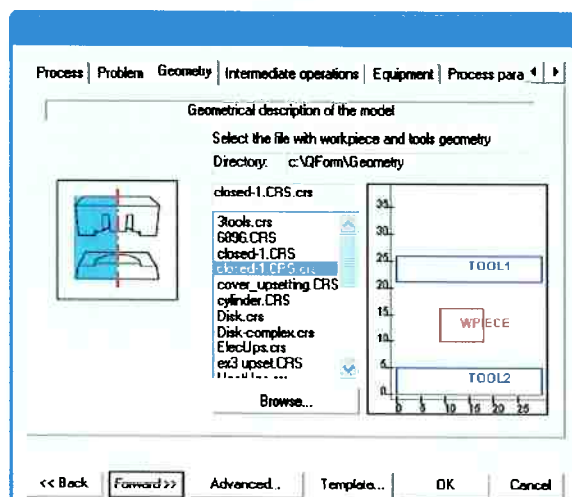
Finalmente, a distância final entre as ferramentas é preenchida. O valor escolhido foi de 3mm que representa no ensaio o valor final da altura do anel.



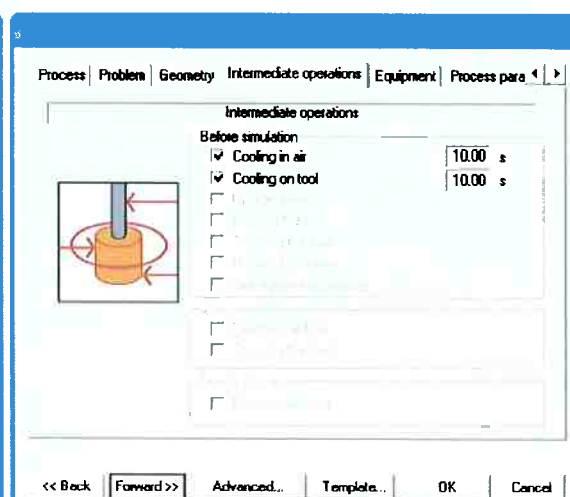
(a)



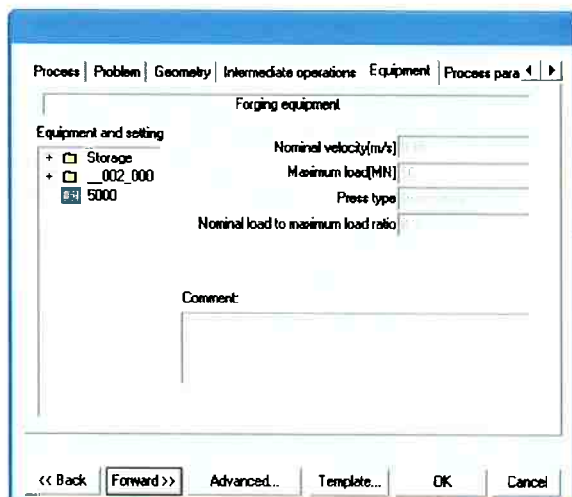
(b)



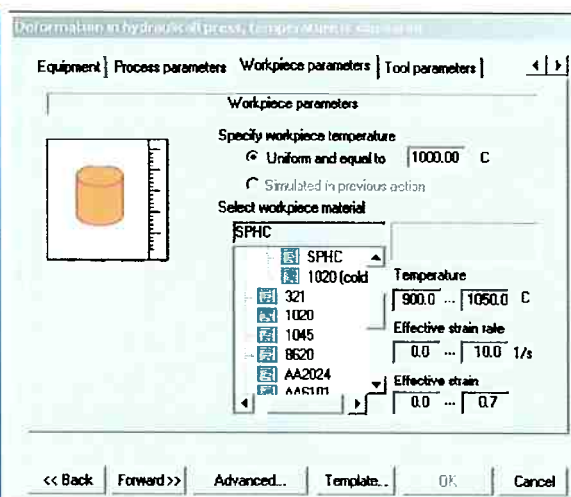
(c)



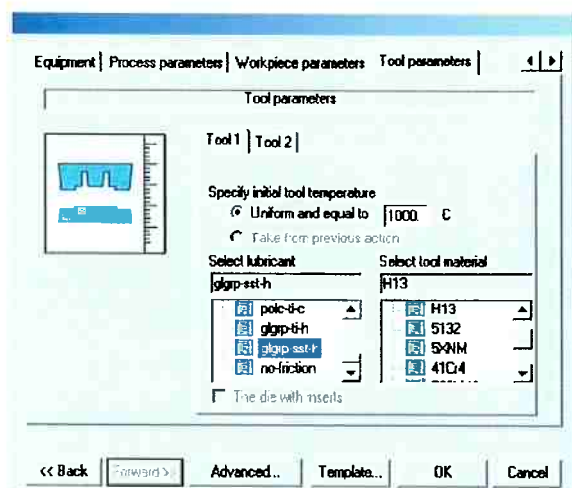
(d)



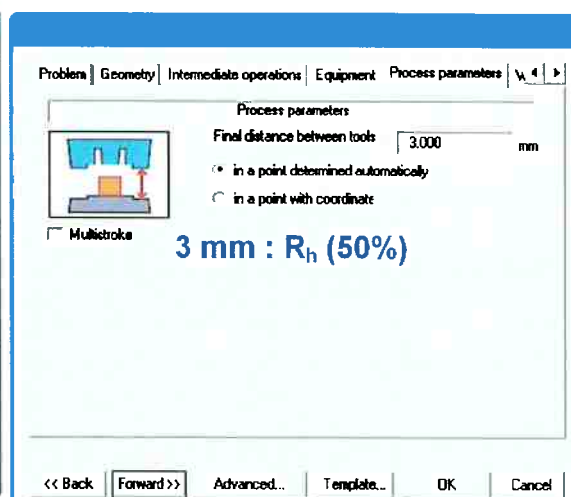
(e)



(f)



(g)



(h)


Figura 5. 7: Condições de contorno do programa QForm. (a) Escolha do processo, (b) Identificação do tipo de problema, (c) Geometria do modelo, (d) Variáveis do problema escolhido em b, (e) Variáveis do processo (f) Parâmetros do processo, (g) Escolha do material, (h) Escolha do lubrificante.

5.3 Dados de saída do QForm

Neste item aborda os dados de saída de interesse na simulação do ensaio de compressão de anel. Esses dados foram coletados tanto para temperatura ambiente quanto em elevadas temperaturas:

- Evolução da geometria do anel, para obter as dimensões do anel;
- Gráficos da distância (altura do anel) versus a carga (P)
- Observação do campo de velocidades em x para comparar com os resultados obtidos pelo método analítico e os resultados de Y. J. Hwu et al.

5.3.1 Evolução da geometria do anel

O QForm possui réguas () que podem medir a peça em qualquer estágio da deformação na simulação (Figura 5.8). Desta forma, podemos encontrar os valores do diâmetro interno (d), diâmetro externo (D) variando com a altura do anel (h). A partir destes valores, as seguintes variáveis são calculadas:

- Redução em altura (R_h);
- Redução no diâmetro interno (R_d);
- Deformação (ϵ);
- Área de contato (A) entre a ferramenta e a peça.

Os cálculos dessas variáveis estão no item 5.4 – tratamento dos dados.

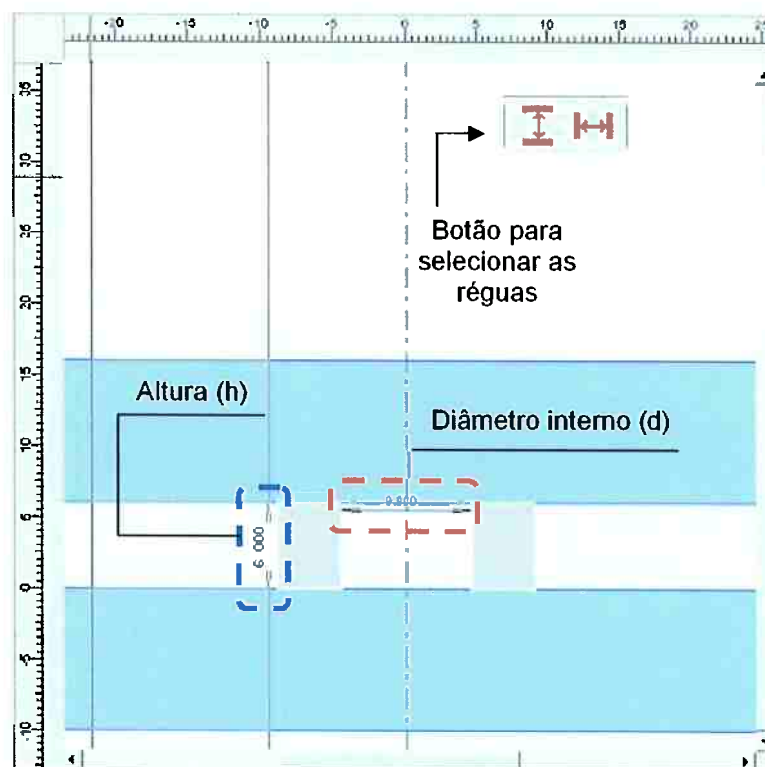


Figura 5. 8: Réguas do programa QForm.

5.3.2 Gráficos

O QForm é capaz de exibir gráficos escolhendo as variáveis da janela abaixo:

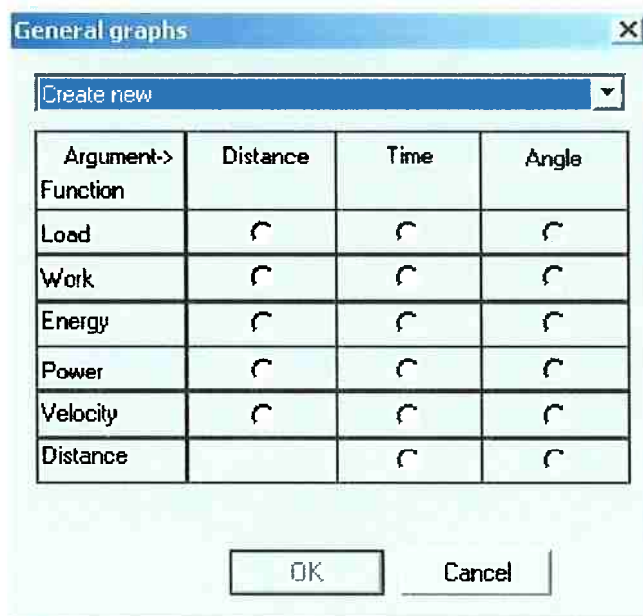


Figura 5.9: Janela de escolhas das variáveis para gerar gráficos no QForm.

O gráfico de interesse no estudo do ensaio de compressão de anel é a primeira opção (Carga versus distância).

- Distância (altura do anel) versus a carga (P):

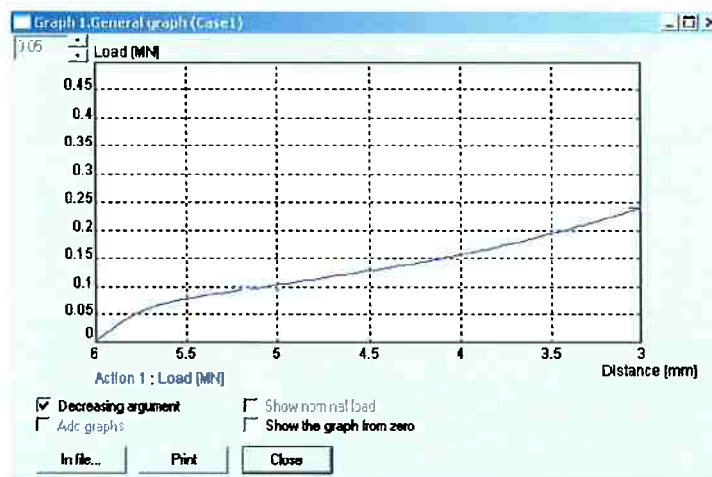


Figura 5.10: Janela do gráfico da distância (altura do anel) versus a carga (P)

A carga (P) do equipamento dividido pela área de contato (A) fornece a pressão média (P_{ave}), que servirá de comparação com os resultados experimentais da literatura.

5.3.3 Imagens geradas para localizar a superfície neutra

O QForm gera imagens em 2D ou 3D, variando com a deformação, do campo das deformações, do campo da taxa de deformação, da tensão de escoamento, da tensão média sobre a peça, do campo de temperaturas, do perfil de velocidades em relação a X ou Y do fluxo do material da peça, ou simplesmente a evolução do contorno da peça.

A figura 5.11 é uma imagem do campo de velocidades no eixo X, em uma deformação de 40% do anel de aço, para uma simulação a 20°C e fator de atrito de 1. Pelo perfil de velocidades no eixo X é possível ver em que direção e intensidade o fluxo do material escoa durante a deformação. Sendo assim, na região onde a velocidade do fluxo é mínima é onde está localizada a superfície neutra.

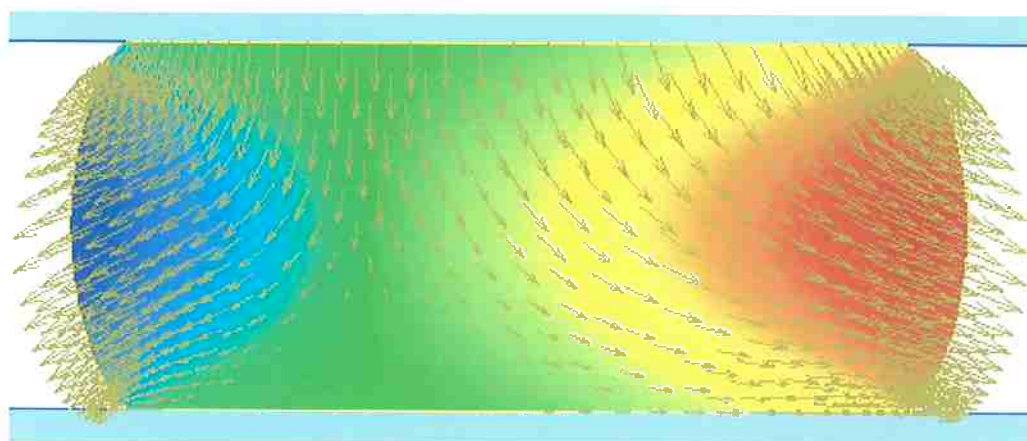


Figura 5. 11: Figura representando os vetores de velocidade.

5.4 Tratamento dos dados

Através dos dados de saída, podemos calcular as variáveis dependentes abaixo:

- Redução no diâmetro interno (R_d):

$$R_d = 100 \cdot \frac{(d_i - d)}{d_i} \quad (1)$$

- Redução em altura (R_h):

$$R_h = 100 \cdot \frac{(h_i - h)}{h_i} \quad (2)$$

- Deformação verdadeira (ϵ):

$$\epsilon = \ln (h_i / h) \quad (3)$$

- Área de contato (A):

$$A = \pi \cdot (D^2 - d^2) / 4 \quad (4)$$

- Pressão média (P_{ave}):

$$P_{ave} = \frac{\text{Carga (P) aplicada}}{\text{Área de contato (A)}} \quad (5)$$

- Tensão de Escoamento médio (σ_{ave}):

$$\sigma_{ave} = \frac{P_{ave}}{P_{ave} / \sigma_{esc}} \quad (6)$$

6. Comparação dos resultados

Os resultados foram separados para melhor análise em:

- Comparação dos resultados a temperatura ambiente;
- Comparação dos resultados a elevadas temperaturas.

6.1 Comparação dos resultados na temperatura ambiente

6.1.1 Comparação das curvas de calibração

Na temperatura ambiente foram comparadas as curvas de calibração gerada a partir do QFORM (Figura 6.1(a)) e as curvas de calibração dada por Y. J. Hwu et al. (Figura 6.1(b))

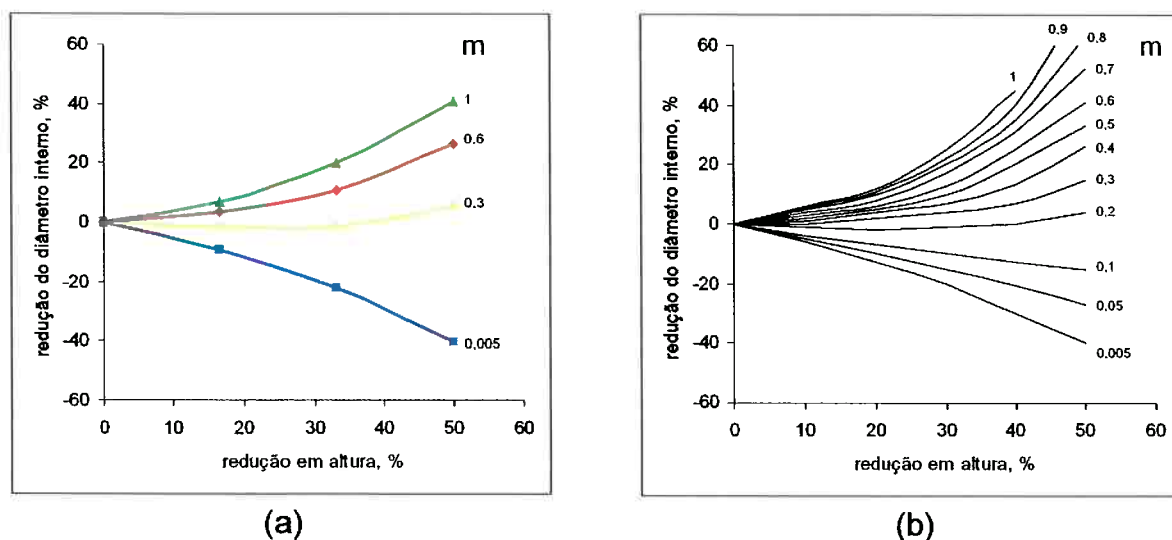


Figura 6. 1: Curvas de calibração para fator de atrito na temperatura ambiente.
(a) Curvas de calibração criadas a partir do QFORM; (b) Curvas de calibração obtidas por Y. J. Hwu et al.

Uma melhor comparação entre as curvas dadas acima é apresentada na figura abaixo:

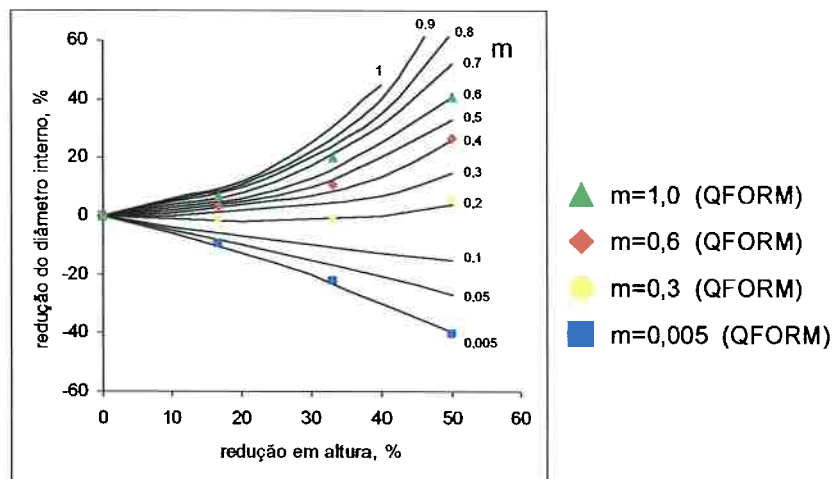


Figura 6. 2: Pontos das curvas de calibração geradas a partir do QFORM sobre as curvas de calibração obtidas por Y. J. Hwu et al.

Como pode ser visto pelos pontos acima, as curvas geradas a partir do QFORM para os fatores de atrito 0,005, 0,3, 0,6 e 1 correspondem respectivamente a 0,005, 0,2, 0,41 e 0,62 (valores aproximados) nas curvas de calibração obtidas por Y. J. Hwu et al. Somente em condições de atrito baixo ($m=0,005$) as curvas de calibração tem o mesmo comportamento.

As curvas de calibração para fator de atrito, geradas a partir do QFORM na temperatura ambiente em diversas taxas de deformação ($0,01\text{s}^{-1}$, $0,1\text{ s}^{-1}$, 1 s^{-1} e 10 s^{-1}), não apresentaram diferenças significativas entre si.

6.1.2 Comparação da pressão média (P_{ave})

Y. J. Hwu et al. apresentou curvas experimentais de pressão média versus deformação para os fatores de atrito 0,07 (figura 4.5) e 0,5 (figura 4.6)

A comparação das curvas de pressão média versus deformação geradas a partir da simulação no QFORM com as experimentais de Y. J. Hwu et al. para os fatores de atrito de 0,07 e 0,5, são apresentadas abaixo:

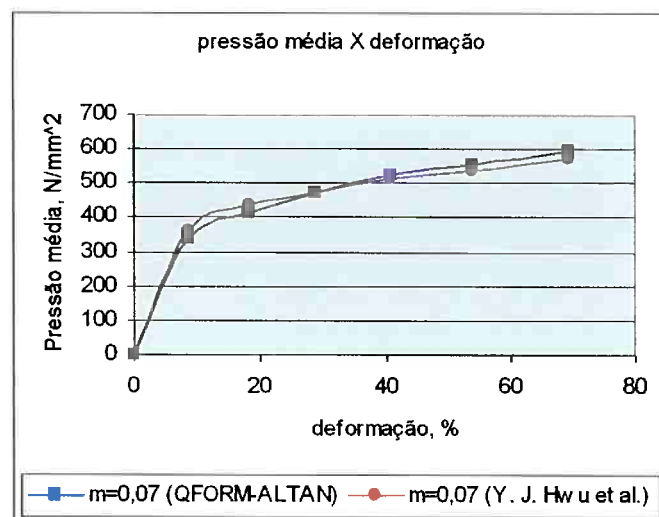


Figura 6. 3: Comparação da pressão média (P_{ave}) versus deformação gerada a partir do QFORM com a experimental de Y. J. Hwu et al para fator de atrito igual a 0,07.

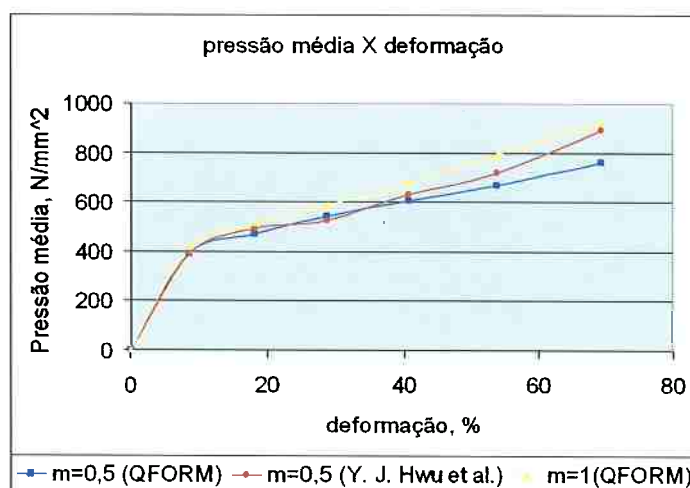


Figura 6. 4: Comparação da pressão média (P_{ave}) versus deformação gerada a partir do QFORM com a experimental de Y. J. Hwu et al para fator de atrito igual a 0,5.

Para um fator de atrito igual 0,07 as curvas de pressão média versus a deformação são praticamente idênticas. Porém, em um fator de atrito igual a 0,5 as curvas não coincidiram. Esta diferença é devida, principalmente, pela forma de como é interpretado o fator de atrito. Vale lembrar no item anterior, que um fator de atrito igual a 0,6 do QFORM, corresponde nas curvas de calibração de Y. J. Whu et al a aproximadamente 0,41.

Ou seja, se utilizarmos um fator de atrito igual a 1 no QFORM que corresponde a aproximadamente 0,62 por Y. J. Whu et al, os valores de pressão média devem ser

superiores a curva experimental com fator de atrito de 0,5 dada Y. J. Whu et al como mostra na figura 6.4.

6.1.3 Comparação da pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave})

Na temperatura ambiente foram comparadas as curvas de pressão média relativa gerada a partir do QFORM (Figura 6.5(a)) e as curvas de pressão média relativa dada por Y. J. Hwu et al. (Figura 6.5(b))

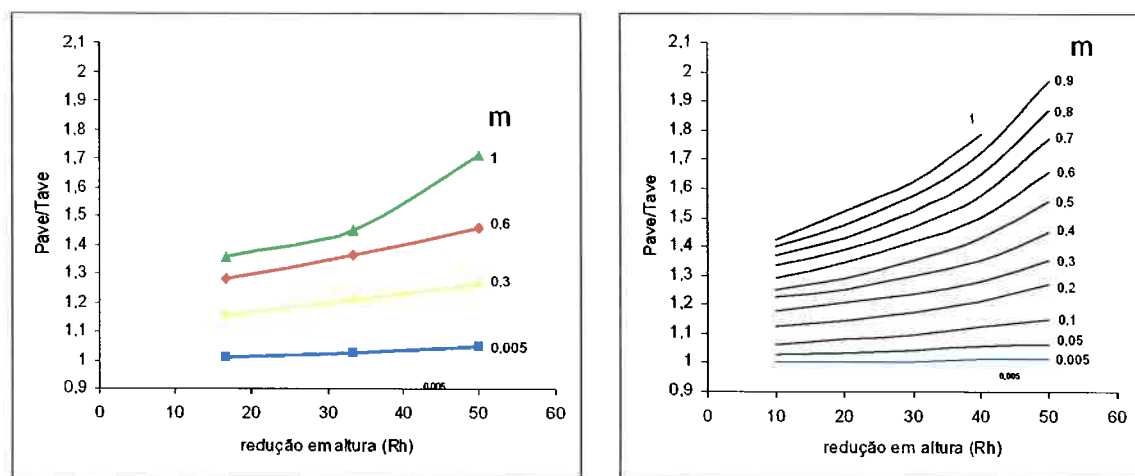


Figura 6. 5: Curvas de pressão média relativa para fator de atrito na temperatura ambiente. (a) Curvas de pressão média relativa criada a partir do QFORM; (b) Curvas de pressão média relativa obtida por Y. J. Hwu et al.

Uma melhor comparação entre as curvas dadas acima é apresentada na figura abaixo:

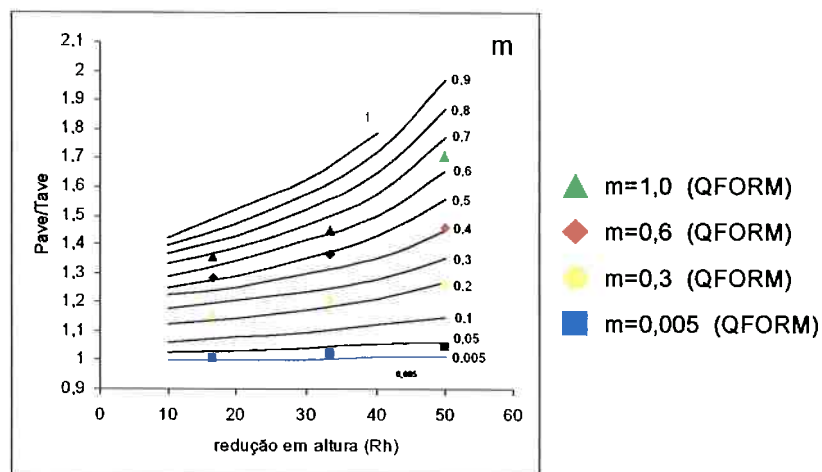


Figura 6.6: Pontos da pressão média relativa gerados a partir do QFORM sobre as curvas determinadas por Y. J. Hwu et al.

Note que, novamente ocorreu uma diferença entre o fator de atrito utilizado na simulação do QFORM e o utilizado para construir as curvas de pressão relativa média encontradas por Y. J. Hwu et al.

Contudo essa diferença é bastante semelhante ao encontrado na comparação das curvas de calibração. Os fatores de atrito 0,005, 0,3, 0,6 e 1 utilizados no QFORM correspondem aos fatores de atrito 0,007, 0,22, 0,42 e 0,63 (valores aproximados), respectivamente, encontrados nas curvas de pressão relativa média dada por Y. J. Hwu et al, respectivamente.

6.2 Comparação dos resultados em elevadas temperaturas

6.2.1 Comparação das curvas de calibração

Na temperatura de 1000°C foram comparadas às curvas de calibração geradas a partir do QFORM (Figura 6.7(a)) e a curvas de calibração dada por Y. J. Hwu et al. (Figura 6.7(b))

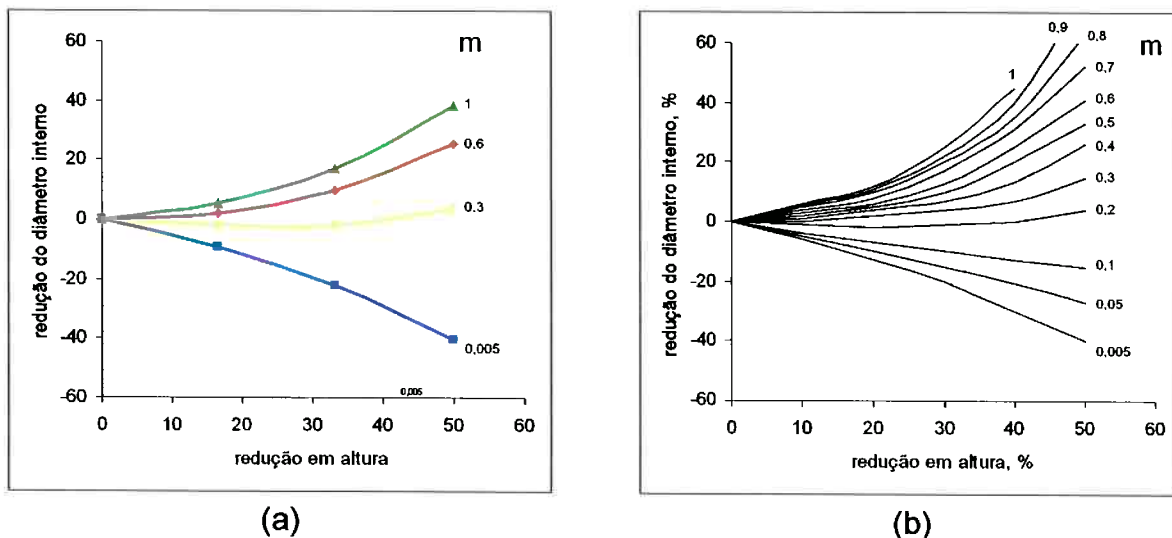


Figura 6. 7: Curvas de calibração para fator de atrito em elevadas temperaturas. (a) Curvas de calibração criadas a partir do QFORM (1000°C, 10s⁻¹); (b) Curvas de calibração obtidas por Y. J. Hwu et al.

Uma melhor comparação entre as curvas dadas acima é apresentada na figura abaixo:

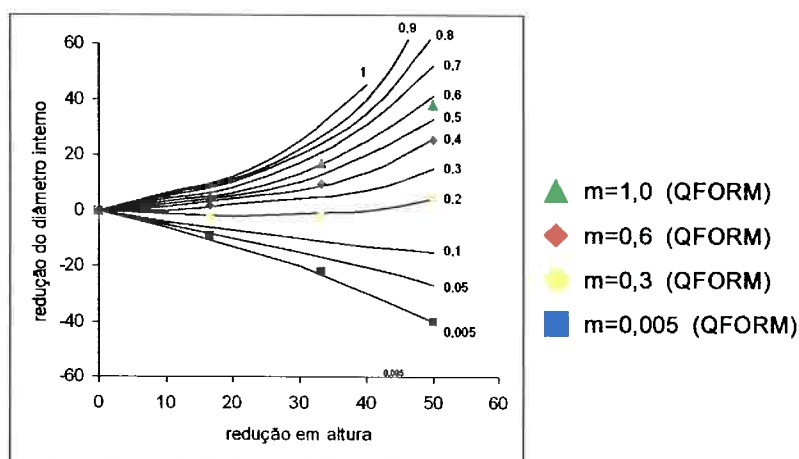


Figura 6. 8: Pontos da curvas de calibração geradas a partir do QFORM sobre as curvas de calibração obtidas por Y. J. Hwu et al.

Como pode ser visto pelos pontos acima, as curvas geradas a partir do QFORM para os fatores de atrito 0,005, 0,3, 0,6 e 1 correspondem respectivamente a 0,005,

0,2, 0,4 e 0,59 (valores aproximados) nas curvas de calibração obtidas por Y. J. Hwu et al. Somente em condições de atrito baixo ($m=0,005$) as curvas de calibração tem o mesmo comportamento.

Em comparação com as curvas geradas a partir do QFORM na temperatura ambiente e em elevadas temperaturas, não possuem diferenças significativas como mostra a figura abaixo:

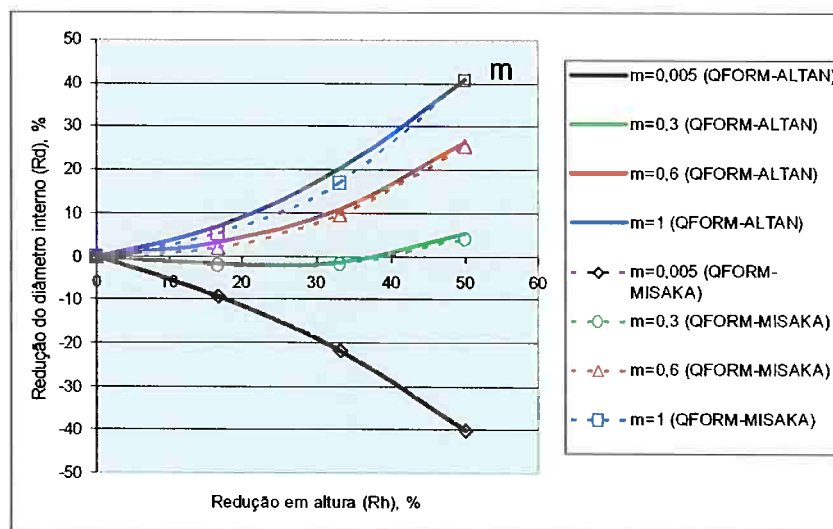


Figura 6.9: Comparação entre as curvas de calibração para fator de atrito geradas a partir do QFORM na temperatura ambiente e em elevadas temperaturas.

As curvas de calibração para fator de atrito geradas a partir do QFORM em elevadas temperaturas em diversas taxas de deformação ($0,01s^{-1}$, $0,1 s^{-1}$, $1 s^{-1}$ e $10 s^{-1}$) nas temperaturas $950^{\circ}C$, $1000^{\circ}C$ e $1050^{\circ}C$ não apresentaram diferenças significativa.

6.2.2 Comparação da pressão média relativa (P_{ave}/σ_{ave})

Foram comparadas as curvas de pressão média relativa gerada a partir do QFORM (Figura 6.10(a)) numa temperatura inicial de 1000°C, sob taxa de deformação de $10s^{-1}$ e as curvas de pressão média relativa dada por Y. J. Hwu et al. (Figura 6.10(b))

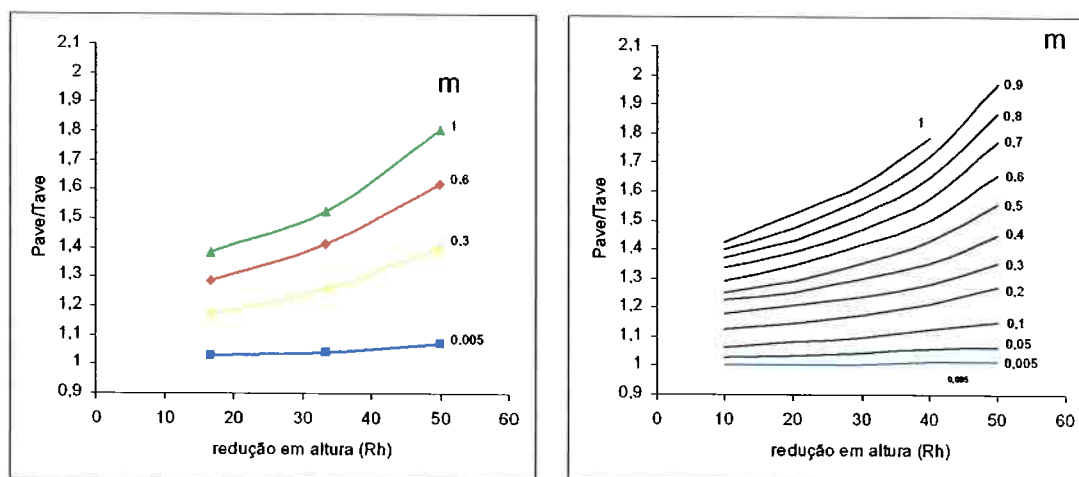


Figura 6. 10: Curvas de pressão média relativa para fator de atrito na temperatura ambiente. (a) Curvas de pressão média relativa criada a partir do QFORM; (b) Curvas de pressão média relativa obtida por Y. J. Hwu et al.

Uma melhor comparação entre as curvas dadas acima é apresentada na figura abaixo:

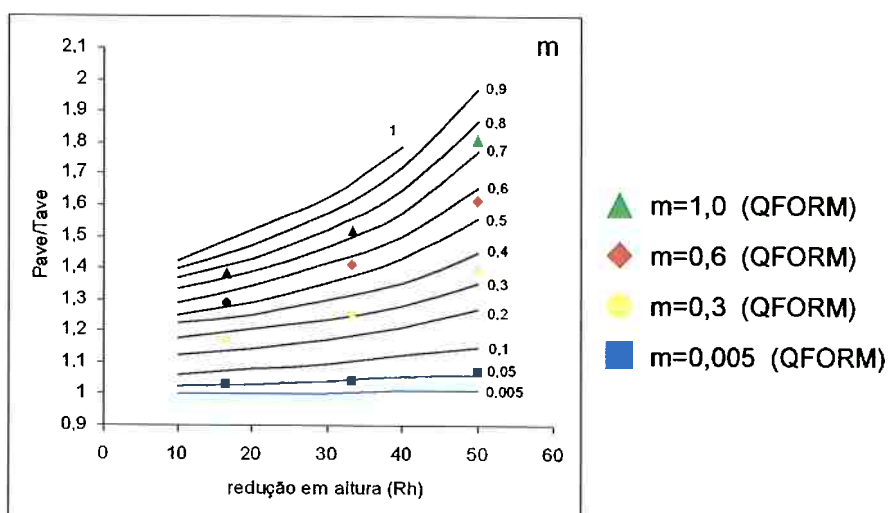


Figura 6. 11: Pontos da pressão média relativa geradas a partir do QFORM sobre as curvas determinadas por Y. J. Hwu et al.

Os valores de fatores de atrito encontrados novamente não corresponderam com o utilizado no QFORM. Os fatores de atrito 0,005, 0,3, 0,6 e 1 utilizados no QFORM correspondem aos fatores de atrito encontrados nas curvas de pressão relativa média dada por Y. J. Hwu et al a 0,04, 0,31, 0,56 e 0,71 (valores aproximados) respectivamente.

Por elementos finitos, em elevadas temperaturas as curvas de pressão média relativa sofrem modificação em relação a temperatura ambiente. Esta modificação é apresentada na figura abaixo:

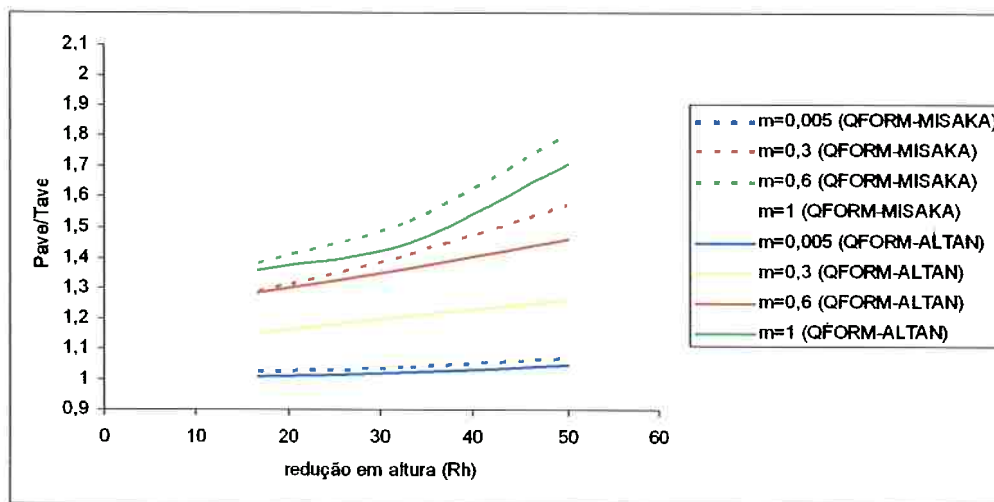


Figura 6.12: Comparação entre as curvas de pressão média relativas geradas a partir do QFORM na temperatura ambiente e em elevadas temperaturas.

7 Conclusão

1 Temperatura ambiente

1.1 – As curvas de calibração para determinar o fator de atrito geometricamente encontradas na temperatura ambiente (20°C), nas taxas de deformação de $0,1s^{-1}$, $1s^{-1}$ e $10s^{-1}$, utilizando um fator de atrito constantes, geradas a partir do QFORM não sofreram diferenças significativas entre si. Fato que Y. J. Hwu et al considerou ao determinar as suas curvas de calibração.

1.2 – As curvas de calibração para determinar o fator de atrito geometricamente e as curvas de pressão média relativa, geradas a partir do QFORM, para os fatores de atrito constantes, 0,005, 0,3, 0,6 e 1, apresentam um comportamento próximo em ambas as curvas determinadas por Y. J Hwu et al. para os fatores de atrito 0,007, 0,21, 0,41 e 0,61 respectivamente, ou seja, a única diferença relevante entre as curvas geradas por elementos finitos e as encontradas por Y. J. Hwu et al, é a quantificação dada para o fator de atrito.

1.3 – Outro fato que reforça o item 1.2, provém do experimento realizado por Y. J. Hwu et al, o ensaio sem a utilização de lubrificantes, possui fator de atrito aproximadamente igual a 0,5, pelas curvas de calibração determinadas por Y. J. Hwu et al. As curvas de pressão média versus a deformação sem a utilização de lubrificante situa-se entre as curvas de pressão versus a deformação, para os fatores de atrito 0,6 e 1 utilizados no QFORM.

1.4 – Como o fator de atrito é no máximo 1, não deverá existir curvas de calibração para determinar o fator de atrito geometricamente acima desta, porém devido a diferença na quantificação do fator de atrito, visto no item 1.2, seguindo as curvas determinadas por Y. J. Whu et al (fatores de atrito acima de 0,62), permitem reduções no diâmetro interno que não seria possíveis utilizando as curvas geradas a partir do QFORM. Fato que pode ser analisado, aplicando ensaio de compressão de anel de aço em elevado (fator de) atrito.

2 Elevadas temperaturas

2.1 – As curvas de calibração para determinar o fator de atrito geometricamente encontradas em temperaturas elevadas (950°C, 1000°C e 1050°C), nas taxas de deformação de $0,1s^{-1}$, $1s^{-1}$ e $10s^{-1}$, utilizando um fator de atrito constantes, geradas a partir do QFORM não sofreram diferenças significativas entre si. Fato que Y. J. Hwu et al considerou ao determinar as suas curvas de calibração.

2.2 – As curvas de calibração para determinar o fator de atrito geometricamente na temperatura ambiente e em elevadas temperaturas, geradas a partir do QFORM, são semelhantes, ou seja, é possível utilizar as mesmas curvas de calibração em quaisquer temperaturas (20°C, 950°C-1050°C). Fato que, Y. J. Hwu também considerou que é válido.

2.3 – Baseado no item 2.2, a diferença encontrada na quantificação do atrito na temperatura ambiente, entre as curvas de calibração para determinar o fator de atrito geometricamente, geradas a partir do QFORM com as curvas determinadas por Y. J. Hwu et al, pode ser estendida para elevadas temperaturas.

2.4 - Em elevadas temperaturas, as curvas de pressão média relativa geradas a partir de elementos finitos, sofreram uma pequena ascensão em relação às encontradas na temperatura ambiente, para um mesmo fator de atrito constante. Logo, por elementos finitos, as curvas de pressão média relativa não podem ser consideradas as mesmas para quaisquer temperaturas (20°C, 950°C-1050°C), discordando com as conclusões feitas por Y. J. Hwu et al.

3 Elementos finitos versus Y. J. Hwu et al.(empregando os conceitos de Avitzur)

Para Y. J. Hwu et al. gerar as curvas de calibração para fator de atrito e as curvas de pressão média relativa, considerou em seus cálculos, empregando os conceitos de Avitzur, valores do raio interno, raio externo, altura do anel, fator de atrito, considerou o abaulamento da peça através do cálculo do parâmetro de abaulamento

(b) e adotou o critério de Von Mises, que considera que o material permaneça com volume constante e isotrópico durante a deformação.

Por elementos finitos a geometria da amostra (anel) é dividida em uma malha ou pontos espalhados, cada um destes pontos é analisado levando-se em consideração deformação, taxa de deformação, temperatura, tensão de escoamento, entre outros fatores, interagindo com as regiões vizinhas.

Logo, o ensaio de compressão de anel em elementos finitos é desenvolvido de uma maneira mais próxima da realidade. Sendo assim, preferível optar pelas curvas de calibração para determinar o fator de atrito geometricamente e as curvas de pressão média relativa criadas em elementos finitos.

8 Bibliografia

- [1] Yhu-JenHwu, Chwan-Tzong Hsu e Fengyin Wang, *Measurement of friction and the flow stress of steels at room and elevated temperatures by ring-compression tests*, **Journal of Materials Processing Technology**, 37 (1993), pp. 319-335.
- [2] K. P. Rao e K. Sivaram, *A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves*, **Journal of Materials Processing Technology**, 37 (1993), pp. 295-318.
- [3] Male, A. T. e Cockroft, M. G., *A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation*, **Journal Institute Metals**, 93(1965), pp. 38-46.
- [4] Börder, Carlos, *Análise do coeficiente de atrito no ensaio do anel para o forjamento a quente*, dissertação de defesa de Mestrado, **EPUSP** (2005);
- [5] Sofuoglu, H., Gedikli, H., Rasty, J., *Determination of Friction Coefficient by Employing the Ring Compression Test*, **ASME, J Eng. Master. Tech**, 123, pp338-348.
- [6] Altan, Taylan, T., *Conformação de metais: Fundamentos e Aplicações*, **EESC-USP**, 1999.
- [7] F. Siciliano Jr., *Recuperação e recristalização durante a deformação a quente*, **Capítulo 8, Textura e relações de orientação 2** (2003), pp129-150.
- [8] R. Barbosa, *Simulação de processos industriais a partir do ensaio de torção a quente*, **Capítulo 9, Textura e relações de orientação 2** (2003) pp151-162.
- [9] B. Avitzur, *Metal Forming: Processes and Analysis*, **McGraw-Hill**, New York, 1968.
- [10] R.S. Hartley, T.J. Cloete e G.N. Nurick, *An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test*, **International Journal of Impact Engineering**, 34 (2007), pp 1705–1728

Apendice A

Tabela de resultados geradas a partir do QFORM

Temperatura ambiente

| m | h | d | D | ϵ | Rh | Rd | Rn | Area | C | Rn |
|-------|----|--------|--------|------------|-------|--------|------|--------|-------|------|
| | mm | mm | mm | % | % | % | mm | Mm^2 | MN | mm |
| 0,005 | 6 | 9 | 18,00 | 0 | 0 | 0 | 0,59 | 190,75 | 0 | - |
| 0,005 | 5 | 9,844 | 19,71 | 18,23 | 16,67 | -9,38 | 0,74 | 228,70 | 0,093 | - |
| 0,005 | 4 | 10,979 | 22,03 | 40,55 | 33,33 | -21,99 | 0,97 | 285,57 | 0,14 | - |
| 0,005 | 3 | 12,622 | 25,421 | 69,31 | 50 | -40,24 | 1,39 | 380,97 | 0,215 | - |
| 0,3 | 6 | 9 | 18,00 | 0 | 0 | 0 | 4,89 | 190,75 | 0 | 4,5 |
| 0,3 | 5 | 9,154 | 21,70 | 18,23 | 16,67 | -1,71 | 5,64 | 225,62 | 0,105 | 4,75 |
| 0,3 | 4 | 9,128 | 21,80 | 40,55 | 33,33 | -1,42 | 5,69 | 275,98 | 0,16 | 4,91 |
| 0,3 | 3 | 8,513 | 24,854 | 69,31 | 50 | 5,41 | 6,24 | 367,76 | 0,25 | 5,5 |
| 0,6 | 6 | 9 | 18,00 | 0 | 0 | 0 | 5,39 | 190,75 | 0 | 5,5 |
| 0,6 | 5 | 8,709 | 19,29 | 18,23 | 16,67 | 3,23 | 5,62 | 218,21 | 0,113 | 5,9 |
| 0,6 | 4 | 8,016 | 20,92 | 40,55 | 33,33 | 10,93 | 5,84 | 267,11 | 0,175 | 5,8 |
| 0,6 | 3 | 6,617 | 23,29 | 69,31 | 50 | 26,48 | 6,08 | 356,51 | 0,28 | 5,5 |
| 1 | 6 | 9 | 18,00 | 0 | 0 | 0 | 5,68 | 190,75 | 0 | 4,8 |
| 1 | 5 | 8,38 | 19,32 | 18,23 | 16,67 | 6,89 | 5,83 | 209,30 | 0,115 | 5,5 |
| 1 | 4 | 7,182 | 21,01 | 40,55 | 33,33 | 20,2 | 5,93 | 258,79 | 0,18 | 5,62 |
| 1 | 3 | 5,333 | 23,405 | 69,31 | 50 | 40,74 | 6,08 | 352,98 | 0,325 | 5,5 |

Tabela A1: Valores retirados do QFORM na temperatura ambiente

Elevadas temperaturas



| m | h | d | D | ϵ | Rh | Rd | Rn | Area | C | Rn |
|-------|----|--------|--------|------------|-------|--------|------|---------|--------|------|
| | mm | mm | mm | % | % | % | mm | Mm^2 | MN | mm |
| 0,005 | 6 | 9 | 18,00 | 0 | 0 | 0 | 0,59 | 190,75 | 0 | - |
| 0,005 | 5 | 9,844 | 19,71 | 18,23 | 16,67 | -9,378 | 0,74 | 228,704 | 0,024 | - |
| 0,005 | 4 | 10,978 | 22,03 | 40,55 | 33,33 | -21,98 | 0,97 | 285,576 | 0,036 | - |
| 0,005 | 3 | 12,622 | 25,421 | 69,31 | 50 | -40,24 | 1,39 | 380,292 | 0,055 | - |
| 0,3 | 6 | 9 | 18,00 | 0 | 0 | 0 | 4,89 | 190,75 | 0 | 4,5 |
| 0,3 | 5 | 9,189 | 21,70 | 18,23 | 16,67 | -2,1 | 5,64 | 226,208 | 0,027 | 4,75 |
| 0,3 | 4 | 9,164 | 21,80 | 40,55 | 33,33 | -1,822 | 5,69 | 276,219 | 0,042 | 4,91 |
| 0,3 | 3 | 8,628 | 24,854 | 69,31 | 50 | 4,133 | 6,24 | 365,746 | 0,067 | 5,5 |
| 0,6 | 6 | 9 | 18,00 | 0 | 0 | 0 | 5,39 | 190,75 | 0 | 5,5 |
| 0,6 | 5 | 8,823 | 19,28 | 18,23 | 16,67 | 1,967 | 5,62 | 220,760 | 0,029 | 5,9 |
| 0,6 | 4 | 8,127 | 21,39 | 40,55 | 33,33 | 9,7 | 5,84 | 269,003 | 0,046 | 5,8 |
| 0,6 | 3 | 6,7 | 23,25 | 69,31 | 50 | 25,56 | 6,08 | 353,014 | 0,075 | 5,5 |
| 1 | 6 | 9 | 18,00 | 0 | 0 | 0 | 5,68 | 190,75 | 0 | 4,8 |
| 1 | 5 | 8,529 | 19,32 | 18,23 | 16,67 | 5,233 | 5,83 | 215,761 | 0,0305 | 5,5 |
| 1 | 4 | 7,461 | 21,01 | 40,55 | 33,33 | 17,1 | 5,93 | 260,38 | 0,048 | 5,62 |
| 1 | 3 | 5,538 | 23,405 | 69,31 | 50 | 38,47 | 6,08 | 356,726 | 0,087 | 5,5 |

Tabela A2: Valores retirados do QFORM na temperatura de 1000°C

Apendice B

Curvas da carga versus deformação gerados pelo QFORM

Encontrados na temperatura ambiente:

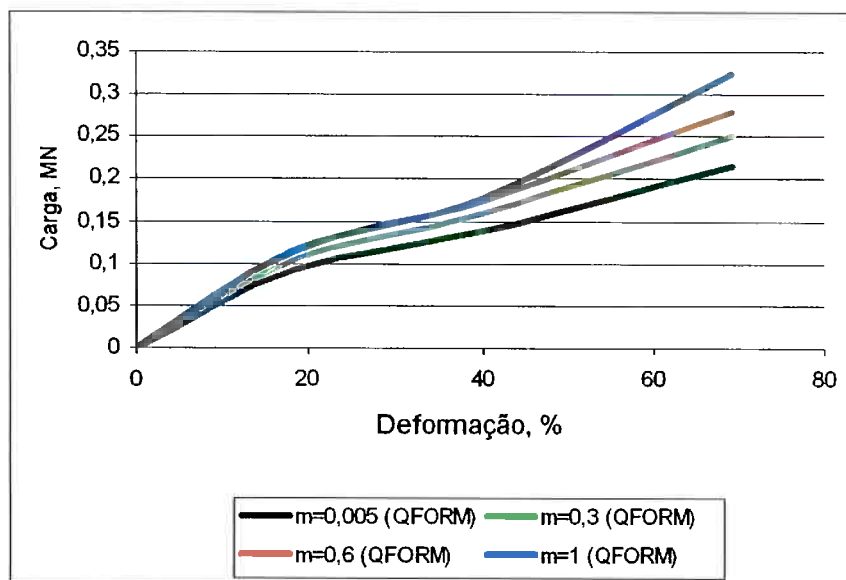


Figura B1: Curvas da carga versus deformação, geradas pelo QFORM na temperatura ambiente (20°C).

Encontrados em elevadas temperaturas:

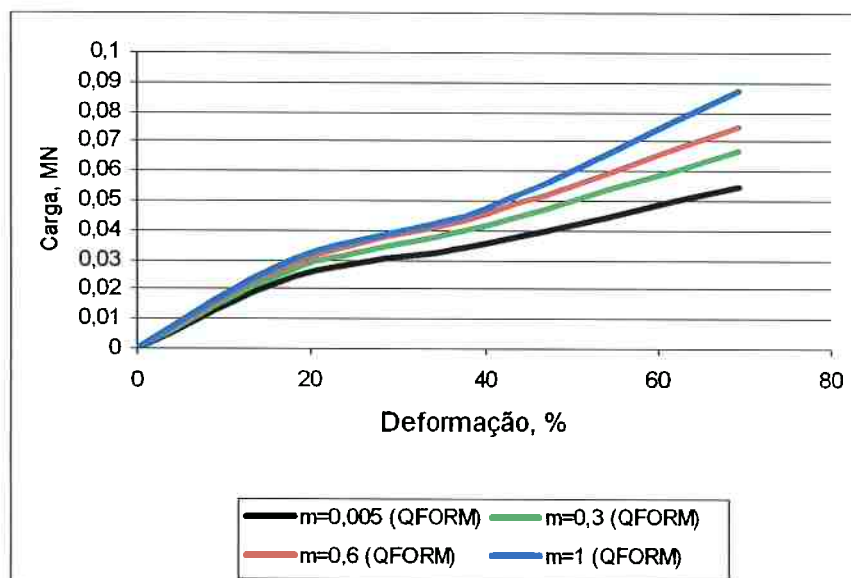


Figura B2: Curvas da carga versus deformação, geradas pelo QFORM em temperaturas elevadas (1000°C-10s⁻¹).

Apendice C

Curvas de pressão média versus deformação gerados pelo QFORM

Encontrados na temperatura ambiente:

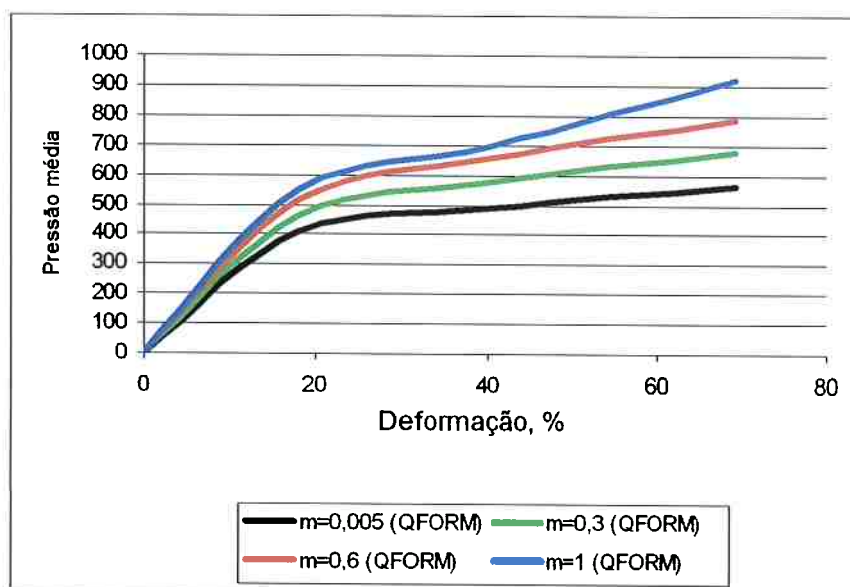


Figura C2: Curvas de pressão média versus deformação, geradas pelo QFORM na temperatura ambiente (20°C).

Encontrados em elevadas temperaturas:

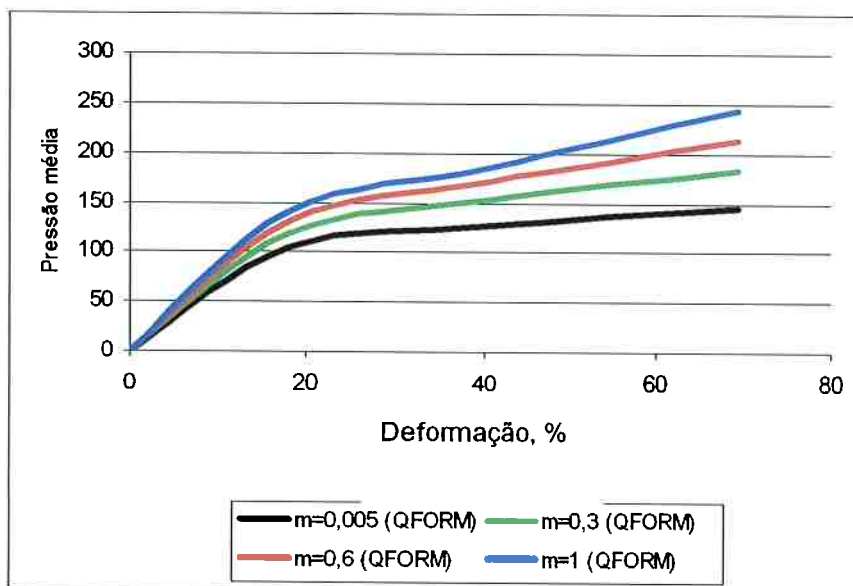


Figura C2: Curvas de pressão média versus deformação, geradas pelo QFORM em temperaturas elevadas (1000°C-10s⁻¹).

Apendice D

Curvas de tensão de escoamento geradas a partir da equação de misaka.

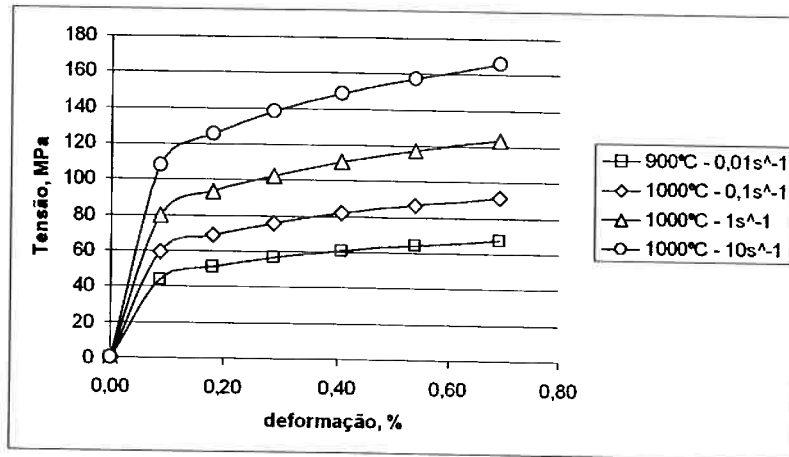


Figura D1: Curvas de escoamento versus deformação, geradas pela equação de MISAKA para temperaturas de 900°C.

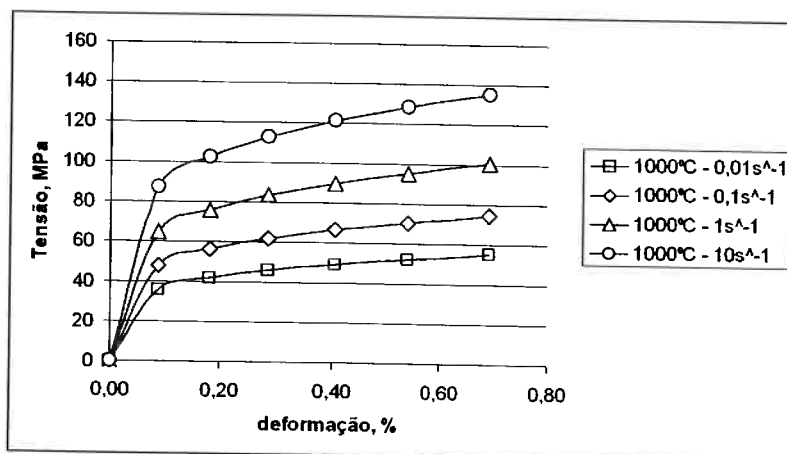


Figura D2: Curvas de escoamento versus deformação, geradas pela equação de MISAKA para temperaturas de 1000°C.