

---

**DANIEL MIORANDO MORITA**

**PROCESSO DE EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR DA LIGA  
DE ALUMÍNIO AA5052: MODELAGEM MATEMÁTICA  
EXPERIMENTOS VISANDO ANÁLISE DE VARIÁVEIS DE  
PROCESSO**

**São Paulo  
2009**

---

**DANIEL MIORANDO MORITA**

**PROCESSO DE EXTRUSÃO EM CANAL ANGULAR DA LIGA DE  
ALUMÍNIO AA5052: MODELAGEM MATEMÁTICA EXPERIMENTOS  
VISANDO ANÁLISE DE VARIÁVEIS DE PROCESSO**

Monografia apresentada ao  
Departamento de Engenharia de  
Materiais e Metalurgia da Escola  
Politécnica da Universidade de São  
Paulo.

Áreas de Concentração:  
Engenharia Metalúrgica e de Materiais  
Conformação Mecânica

Orientador:  
Prof. Dr. Ronald Lesley Plaut

**São Paulo  
2009**

---

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha esposa, aos meus pais e todos os demais quem sempre me apoiaram.

---

## **AGRADECIMENTOS**

À minha amada esposa, por todo amor, carinho e dedicação.

Ao professor Ronald Lesley Plaut, pela orientação e pelo constante apoio, incentivo e colaboração durante todo o desenvolvimento desta monografia.

Aos meus pais, porque sem eles não estaria onde estou hoje.

Ao técnico Rubens, do Hall- Tecnológico, por todo o suporte e colaboração.

A todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

## SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	II
AGRADECIMENTOS.....	III
SUMÁRIO.....	IV
RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE GRÁFICOS.....	XII
LISTA DE EQUAÇÕES.....	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	02
2.1. A Extrusão em Canal Angular.....	02
2.2. Deformação por Cisalhamento.....	05
2.3. A Distribuição de Deformação ao Longo da Seção Transversal.....	06
2.4. Influência do Ângulo Externo $\Psi$ na Homogeneidade de Escoamento no Processo de ECAP.....	08
2.5. ECAP vs ECAE.....	09
3. OBJETIVOS.....	10

<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>11</b>
4.1. Material dos Corpos de Prova.....	11
4.2. Equipamentos.....	12
4.3. Construção da Matriz de Canais Angulares Sequenciais.....	13
4.4. Procedimento Experimental.....	20
4.5. Simulação no Qform3D.....	22
4.5.1. Considerações Iniciais.....	22
4.5.2. Configurando o processo de conformação no QForm 3D.....	23
4.5.2.1. Passo 1: Processo.....	24
4.5.2.2. Passo 2: Ações Prévias.....	25
4.5.2.3. Passo 3: Tipo de problema envolvido.....	25
4.5.2.4. Passo 4: Geometria.....	26
4.5.2.5. Passo 5: Operações Intermediárias.....	27
4.5.2.6. Passo 6: Equipamentos.....	28
4.5.2.7. Passo 7: Parâmetros de processamento.....	29
4.5.2.8. Passo 8: Parâmetros do corpo de prova.....	30
4.5.2.8.1 Edição do Tipo de Material.....	31
4.5.2.8.1.1 Calculo do parâmetro K e do parâmetro n.....	32
4.5.2.8.1.2 Inserindo os demais parâmetros do material.....	33
4.5.2.9. Passo 9: Parâmetros da ferramenta.....	34
4.5.3. Simulando a Ferramenta 2 (Matriz).....	35
<b>5. RESULTADOS.....</b>	<b>39</b>
5.1. Resultados do Ensaio na Prensa Elétrica EMIC – DL30000.....	39
5.2. Resultados da Simulação do Corpo de Prova no QForm 3D.....	40
<b>6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>48</b>
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>52</b>

<b>ANEXO A - ENSAIO PRELIMINAR.....</b>	<b>53</b>
<b>ANEXO B - RELATÓRIO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA A LIGA AA5052.....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO C - RELATÓRIO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA A LIGA AA5052 NA MÁQUINA DE ENSAIO DE COMPRESSÃO EMIC – ECAP 90 GRAUS.....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO D – RELATÓRIO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO PARA A LIGA AA5052 NA MÁQUINA DE ENSAIO DE COMPRESSÃO EMIC – ECAP 120 GRAUS.....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO E – DIMENSÕES NA MONTAGEM DA MATRIZ 3.....</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO F – PROCEDIMENTO DE OBTENÇÃO DO ARQUIVO .SHL NO QSHAPE.....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>69</b>

---

A superioridade é caracterizada pelo que você é, não  
pelo que você diz ou finge ser.

## RESUMO

Apesar de ter sido descoberto já há muitos anos, o processo de conformação mecânica dos materiais conhecido como “Extrusão em Canal Angular Sequencial” só tem recebido mais atenção nos últimos tempos. Em virtude da crescente exigência, ou melhor, necessidade por materiais que sejam cada vez mais leves porém, ao mesmo tempo apresentando propriedades satisfatórias, os estudos sobre métodos objetivando alcançar tais metas tem se tornado mais frequentes. Tem-se observado desta maneira, um crescente aumento na quantidade de estudos e proposições associados à Extrusão em Canal Angular Sequencial, que basicamente é uma técnica de deformação plástica severa cujo objetivo é melhorar as propriedades mecânicas por meio do refino de grão obtido através de uma grande deformação plástica. Este trabalho visa averiguar estas proposições, tanto na prática como por meio de simulação numérica com o auxílio de um programa de elementos finitos tridimensional.

## **ABSTRACT**

Although it was discovered many years ago, the process of mechanical working of materials known as "Equal Channel Angular Extrusion or Pressing (ECAP)" has only received more attention recently. Due to increasing demand, or rather the need for materials that are increasingly lighter but at the same time presenting satisfactory mechanical properties, studies of methods aiming to achieve these goals have become more frequent. There has been in this way an increasing number of studies, articles and proposals related to Equal Channel Angular Pressing, which is basically a technique of severe plastic deformation which aims to improve the mechanical properties by refining grain through an intense plastic deformation. This graduation conclusion work has as objective examine these propositions, both in practice and through numerical simulation with the help of a program of three-dimensional finite elements.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do processo ECAP.....	02
Figura 2 - Figura 2 - A geometria tradicional da matriz empregada no processo de ECAP onde o angulo de intersecção entre os dois canais é $\Phi$ e o angulo de arredondamento do cotovelo é $\Psi = 0$ .....	04
Figura 3 - A geometria tradicional da matriz empregada no processo de ECAP onde o angulo de intersecção entre os dois canais é $\Phi$ e o angulo de arredondamento do cotovelo é $\Psi$ onde $0 < \Psi < \pi - \Phi$ .....	06
Figura 4a - Figura 4 - Seções através do corpo de prova contendo fios de cobre como marcação: situação inicial.....	07
Figura 4b - Seções através do corpo de prova contendo fios de cobre como marcação: (b) esquema do tarugo após 2 passes.....	07
Figura 4c - Seções através do corpo de prova contendo fios de cobre como marcação: (c) após 5 passes, em uma matriz onde os canais angulares sequenciais formam um angulo de $120^\circ$ .....	07
Figura 5 – Corpo de prova.....	12
Figura 6 – Máquina de ensaios EMIC – DL 30000 com carregamento máximo de 300KN.....	13
Figura 7a – Matriz Protótipo bipartida.....	14
Figura 7b – Ampliação da face dos canais.....	15
Figura 8 - Segunda Matriz após rompimento.....	18
Figura 9a – Montagem do Ferramental.....	21
Figura 9b – Montagem do Ferramental.....	22
Figura 10 - Passo Inicial.....	24
Figura 11 - Passo 1.....	24
Figura 12 - Passo 2.....	25
Figura 13 - Passo 3.....	26
Figura 14 - Passo 4.....	27
Figura 15 - Passo 5.....	28
Figura 16 - Passo 6.....	29

Figura 17 - Passo 7.....	30
Figura 18 - Passo 8.....	31
Figura 19 - Acessando o editor de material.....	31
Figura 20 - Parâmetros de Tensão.....	32
Figura 21 - Inserindo Outros Parâmetros.....	34
Figura 22a - Passo9a.....	35
Figura 22b - Passo9b - Configurações avançadas.....	35
Figura 23 - Definindo condições de Contorno para a Ferramenta 2.....	36
Figura 24 - Condições de contorno.....	37
Figura 25 - Visualização das Condições de Contorno.....	37
Figura 26 - Dando início à simulação da ferramenta.....	38
Figura 27 - Extremidade inferior arredondada na Situação 2.....	42
Figura 28 - Situação 1 (Projeto) e Situação 2 (com arredondamento de 4mm)...	42
Figura 29 - Formação de Rebarba na Situação 2.....	43
Figura 30 - Situação 4 (redução de 5% no volume).....	44
Figura 31 - Situação 5 (ângulo de arredondamento de 10mm e 5% de redução em volume).....	47
Figura 32 - Comparação de resultados.....	49
Figura 33 - Preenchimento não perfeito do canal.....	50
Figura 34 - Pontos Críticos.....	51

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva Tensão Deformação.....	33
Gráfico 2 - Ensaio de alumínio AA5052 por ECAP 90° em máquina de ensaio de compressão EMIC.....	39
Gráfico 3 - Ensaio de alumínio AA5052 por ECAP 120° em máquina de ensaio de compressão EMIC.....	40
Gráfico 4 - Situação 1(Modelamento inicial do Projeto).....	41
Gráfico 5 - Situação 2 - Arredondamento da extremidade inferior.....	43
Gráfico 6 - Situação4 (Redução de Volume em 5%).....	45
Gráfico 7 - Situação 5.....	46
Gráfico 8: Comparação entre o ensaio em 120° e em 90°.....	48

---

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Relação de Hall-Petch.....	03
Equação 2 - Tensão de deformação para $\Psi = 0$ .....	05
Equação 3 - Tensão de deformação (forma geral).....	06
Equação 4 – Equação de Hollomon.....	32

## 1. INTRODUÇÃO

Exige-se hoje na indústria, tanto na automobilística como na aeronáutica, materiais que estruturalmente apresentem elevada resistência mecânica mas que para tanto empreguem uma quantidade menor de matéria sem oferecer prejuízo ao desempenho exigido. A motivação principal para tanto é a redução de custo: quanto menos matéria se emprega para obter um mesmo resultado, pode-se ganhar competitividade, aumentar as margens de lucro e, caso interessar, aumentar a acessibilidade ao produto final. Inúmeros minérios que fornecem elementos de liga têm se tornado escassos nas camadas mais superficiais da superfície terrestre, inviabilizando economicamente de maneira gradativa o uso de certas ligas metálicas. Contudo, os motivos mencionados acima não seriam os únicos motivos atrelados à busca por novos materiais. A redução de matéria é intrínseca à uma redução de massa (com ou sem diminuição de densidade), que por sua vez confere abertura para um leque de avanços: um carro mais leve, por exemplo, poderia carregar mais acessórios como itens de segurança ou itens de conforto, sem sofrer perda de potência; ou ainda, para uma mesma potência, consumir menos combustível, contribuindo assim para redução dos níveis de poluição atmosférica.

Um dos métodos estudados já a algum tempo com o objetivo de atender tais exigências de aumento de resistência mecânica de um metal ou liga metálica frente às considerações mencionadas anteriormente é o refino de grão. Este método fornece grãos menores resultando assim em um material com elevadas propriedades mecânicas e ductilidade. Estes materiais apresentam microestruturas do tipo granular contendo grão pequenos com elevado ângulo de contorno de grão além de muitas discordâncias. Observando do ponto de vista mecânico, o refino de grão está associado à capacidade do material se submeter a um comportamento super plástico. Métodos de deformação plástica severa como laminação, extrusão ou forjamento, entre outros, permite-nos introduzir tensões muito elevadas nos materiais, mas tal fato está conhecidamente

associado às mudanças nas dimensões do material, principalmente nas dimensões da seção transversal do mesmo.

A Extrusão em Canal Angular Sequencial ou Prensagem em Canal Equiangular (Equal Channel Angular Pressing - ECAP) é uma das técnicas de deformação severa desenvolvida para produzir estruturas de grão ultra-finas por meio da introdução de uma enorme quantidade de tensão de cisalhamento no material. O processo foi inventado por Segal [22] na década de 70 na antiga União Soviética.

## 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 A Extrusão em Canal Angular

O ECAP é um processo de deformação por cisalhamento puro que consiste basicamente em se fazer passar uma amostra de material de uma extremidade à outra de dois canais (channels) sequenciais que se interceptam fazendo entre si um ângulo  $\phi$  (Figura 1).

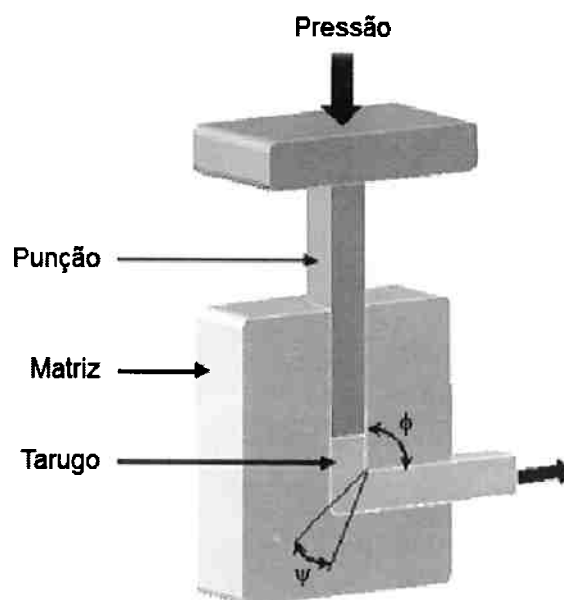


Figura 1 – Esquema do processo ECAP

Isto ocorre conforme a relação de Hall-Petch [1] dada por:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

Equação 1 - Relação de Hall-Petch

Na relação de Hall-Petch,  $\sigma_y$  é a variação da tensão de deformação,  $\sigma_0$  a tensão de deformação intrínseca do material e  $d$  o tamanho de grão.

Segal desenvolveu o processo de ECAP em 1981, na antiga União Soviética [21], de forma que por este método é possível obter tamanhos de grãos micrométricos ou até mesmo nanométricos. Desde então o método vem sendo bastante estudado, tanto pelo seu aspecto prático (redução de tamanho de grão e consequente aumento de resistência mecânica e tenacidade) como para exploração de diversos aspectos fundamentais de plasticidade, recristalização e formação de textura.

Diferentemente do que ocorre com os processos de conformação tradicionais, onde as dimensões da peça são alteradas, limitando assim as suas aplicações, o ECAP apresenta a vantagem de, pelo fato de teoricamente não haver alteração na seção transversal da peça durante o processo, a operação poder ser repetida várias vezes (vários passes) introduzindo muito mais deformação no material para uma mesma dimensão de seção, fato que resulta em grãos ultra finos. Isto é diferente nos demais processos de conformação mecânica, como na laminação, por exemplo, onde a mudança de dimensões do perfil laminado alcança um valor limite.

A análise teórica realizada por Segal constatou que para seções suficientemente largas e assumindo condições ideais de ausência de fricção, o material vai estar submetido apenas a cisalhamento simples o qual resulta em

escoamento plástico estacionário no plano de tensão. Considerando este fato, o processo de ECAP poderia ainda ser utilizado como um meio de se promover texturas específicas desejadas. Como exemplo, texturas (111) // ND, que são eficazes em melhorar a conformabilidade de folhas metálicas com estrutura CFC, poderiam ser geradas causando uma deformação via tensão de cisalhamento [5]. Contudo esta propriedade não será abordada no escopo deste trabalho.

O ângulo  $\Psi$  representa o ângulo associado ao arredondamento da intersecção (ângulo externo) entre os dois canais sequenciais enquanto o  $\Phi$  representa o ângulo que um canal forma com relação ao outro (arco interno) na sequência, como pode ser notado pela Figura 2 e 3.

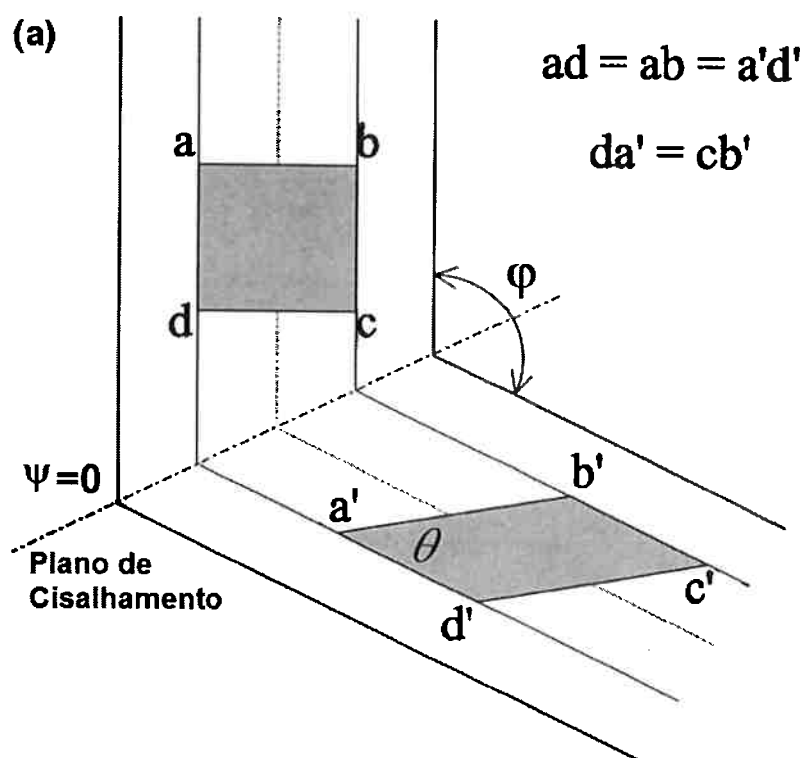


Figura 2 - A geometria tradicional da matriz empregada no processo de ECAP onde o ângulo de intersecção entre os dois canais é  $\Phi$  e o ângulo de arredondamento do cotovelo é  $\Psi = 0$

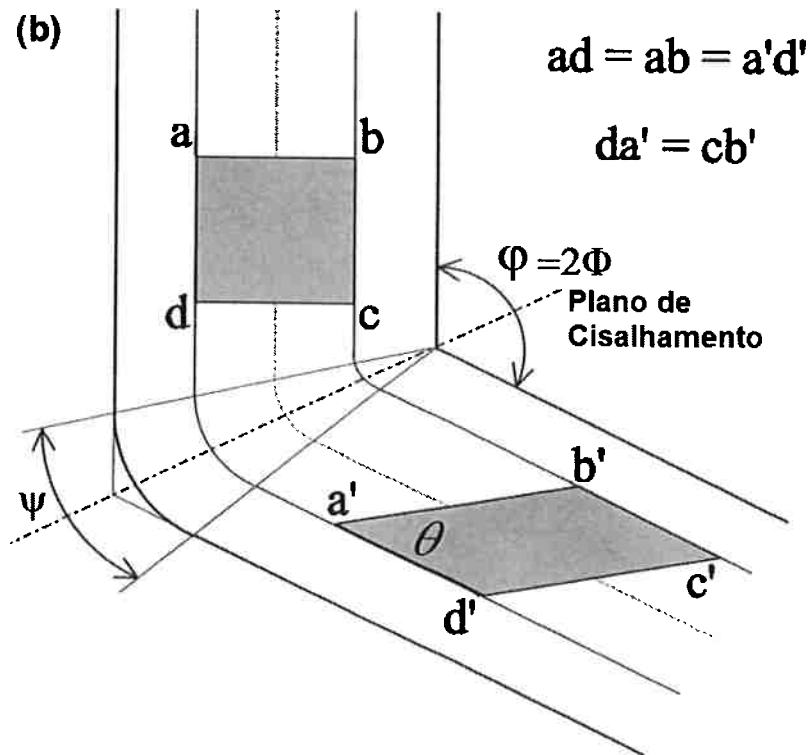


Figura 3 - A geometria tradicional da matriz empregada no processo de ECAP onde o ângulo de intersecção entre os dois canais é  $\Phi$  e o ângulo de arredondamento do cotovelo é  $\Psi$  onde  $0 < \Psi < \pi - \Phi$

## 2.2 Deformação por cisalhamento

A deformação por cisalhamento é dada pela Equação 2 [10], a qual pode ser obtida da figura 2.

$$\varepsilon = \frac{2}{3^{1/2}} \cot \frac{\varphi}{4} \quad \text{ou} \quad \varepsilon = \frac{2}{3^{1/2}} \cot \frac{\Phi}{2}$$

Equação 2 - Deformação por cisalhamento para  $\Psi = 0$

A Equação 3 é uma forma mais generalizada da Equação 2, usando a geometria mostrada na figura 2 (b). Como pode ser observado, a Equação 2 é obtida a partir da Equação 3 [2] para  $\Psi = 0$ .

$$\gamma = 2 \cot \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Psi \operatorname{cosec} \left( \frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right)$$

Equação 3 - Deformação por cisalhamento (forma geral)

### 2.3 A Distribuição de Deformação ao Longo da Seção Transversal

A distribuição de deformação ao longo da seção transversal de uma peça durante ou após o processo de ECAP foi examinada do ponto de vista da uniformidade com que a deformação se distribui [3]. O quesito uniformidade se torna importante quando o ângulo do  $\Psi$  é maior do que zero, ou seja, quando a intersecção possui um arredondamento. Tal importância se deve ao fato de que, na situação em que o ângulo externo é diferente de zero, a diferença entre os valores das deformações entre as áreas próximas ao ângulo externo em relação aos valores medidos próximos ao ângulo interno aumentam.

Contudo, condições de processamento em que tanto  $\Psi$  como a temperatura sejam baixos são muito difícil de serem satisfeitas dada a severidade do processo. A maioria das tentativas em se realizar extrusão nos processos de ECAP vem portanto sendo executadas fazendo uso de um pequeno ângulo externo ( $\Psi$ ) e baixa temperatura (normalmente a ambiente) de maneira a introduzir grande tensão no material de maneira viável.

Uma forma de se driblar o problema de falta de homogeneidade na distribuição de tensões no material, de maneira que a distribuição de deformação se aproxime o máximo possível da distribuição de deformação que seria resultante

de um cisalhamento simples é fazer com que a zona de deformação seja a mais estreita possível. As melhores condições de processamento parecem ser obtidas quando o ângulo entre os canais não possui arredondamento (ângulo externo nulo), quando a fricção é baixa e quando se mantém constante a pressão de compressão por traz do corpo ensaiado enquanto ele atravessa a matriz. Experimentos com a realização de múltiplos passes [10] tem demonstrado que, ao se extrudar repetidamente o corpo de prova seguindo um roteiro de giro do corpo de prova em relação à posição inicial do mesmo que resulte em uma tensão constante, ocorre rotação do material em torno da extremidade final do corpo de prova (aquela que sempre entra primeiro na matriz). Isto resulta em um corpo de prova deformado se enrolando sobre si mesmo durante o processo e possibilitando assim que o corpo de prova mantenha a sua forma inicial apesar da crescente tensão de cisalhamento em cada ciclo de extrusão. Tal comportamento pode ser observado na Figura 4a, 4b e 4c, onde cobre é depositado em um sulco esculpido na lateral do corpo de prova de maneira a demonstrar o deslocamento do material no corpo de prova nas circunstâncias mencionadas.

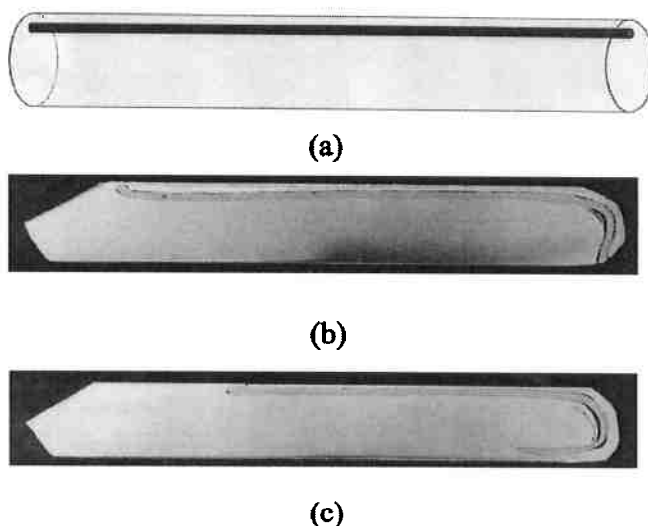


Figura 4 - Seções através do corpo de prova contendo fios de cobre como marcação: (a) situação inicial, (b) esquema do tarugo após 2 passes e (c) após 5 passes, em uma matriz onde os canais angulares sequenciais formam um ângulo de 120°.

Contudo, apesar de o processo de se passar o mesmo corpo de prova pela matriz várias vezes permitir elucidar o mecanismo que permite que o corpo de prova preserve a sua forma inicial, o estudo a respeito de diversos passes bem como o estudo sobre o comportamento do material frente a rotação do corpo de prova em relação à sua posição inicial a cada novo passe não fazem parte do escopo deste trabalho.

## **2.4 Influência do Ângulo Externo $\psi$ na Homogeneidade de escoamento no processo de ECAP**

Avaliando-se o grau de significância do ângulo interno  $\Phi$ , é demonstrado experimentalmente que uma microestrutura homogênea com grãos razoavelmente equiaxiais é obtida de prontidão quando  $\Phi$  é  $90^\circ$  ou próximo de  $90^\circ$ . Por outro lado, não existe uma avaliação detalhada a respeito do ângulo externo  $\Psi$  de arredondamento e a literatura disponível oferece dados conflitantes. Isto provavelmente se deve ao fato de ele só ser introduzido com o intuito de facilitar a passagem do corpo de prova sendo que ninguém ainda se preocupou em estabelecer correlações para como as variáveis do processo se comportam com relação ao mesmo. Por outro lado, se concluiu baseando-se na análise de elementos finitos que o uso de um ângulo de arredondamento levará a um aumento na não homogeneidade [3] de deformação no corpo de prova.

O valor de  $\Psi$  tem grande importância quando levando em consideração o projeto e confecção de uma matriz de ECAP. Uma matriz com  $\Psi = 0^\circ$  pode ser construída facilmente enquanto o contrário é mais complicado.

Na prática, geralmente não é praticável fabricar uma matriz sólida com  $\Psi = 0^\circ$ , visto que o corpo de prova tem dificuldade de atravessar a matriz, e

---

consequentemente estas matrizes são fabricadas com  $\Psi$  da ordem de  $20^\circ$  ou mais. Portanto, seria importante determinar se o uso de uma matriz sólida com ângulo interno  $\Phi=90^\circ$  e ângulo externo  $\Psi$  diferente de  $0^\circ$  introduzem não homogeneidades de forma significativa na peça.

## **2.5 ECAP versus ECAE**

Alguns autores defendem que definir o processo de deformação plástica severa em questão como extrusão está conceitualmente errado visto que o processo se assemelha mais com uma prensagem do que com uma extrusão. Portanto, na literatura existe uma certa divergência quanto à nomenclatura adota. Alguns chamam o processo de “Equal Channel Angular Pressing” (ECAP) e outros chamam de “Equal Channel Angular Extrusion” (ECAE). A nomenclatura mais aceita internacionalmente e mais amplamente difundida é “Equal Channel Angular Pressing”. Todavia, no Brasil, ela é mais conhecida por Extrusão em Canal Angular. Logo, apesar de concordar com a falha conceitual na nomenclatura, foi adotado neste presente trabalho a nomenclatura convencional no Brasil.

---

### **3. OBJETIVOS**

O principal objetivo deste trabalho é avaliar propriedades propostas quanto ao processo de Extrusão em Canal Angular por meio da :

- A construção de uma matriz para extrusão pelo processo de Extrusão em Canal Angular Sequencial.
- A avaliação das dificuldades e problemas envolvidos na construção e a correlação com os conceitos teóricos já consolidados.
- Realizar a comparação entre os dados experimentais e os dados provenientes do modelamento matemático de elementos finitos (Qform 3D) buscando justificativa para eventuais discrepâncias.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Aqui será apresentada a liga utilizada para os ensaios, o método de trabalho associado a cada parte do experimento, construção da matriz de canais angulares sequenciais, detalhes dos procedimentos empregados bem como todas as informações necessárias para a análise dos resultados.

### 4.1 Material dos Corpos de Prova

A liga de alumínio empregada na confecção dos corpos de prova foi a AA5052, comumente conhecida por suas aplicações navais, cuja composição química é descrita na tabela localizada logo abaixo:

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Al
0,09	0,13	0,16	0,23	2,5	0,05	96,84

Composição química da liga AA5052 (% em peso)

O material já se encontrava no Hall Tecnológico sendo previamente empregado em outros trabalhos de formatura, mestrado e doutorado. Ele foi adquirido através da Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) por intermédio do Professor Dr. Ronald Lesley Plaut. O material foi cortado e usinado no formato de "billets" (tarugos) com seção transversal circular, com dimensão semelhante à da entrada do canal angular. As dimensões dos corpos de prova são:  $(x_0)(y_0)(z_0) = (9,5)(9,5)(99,0)$  mm e podem ser melhor compreendidas por meio do Anexo E.



Figura 5 – Corpo de prova

#### 4.2 Equipamentos

Para a realização dos ensaios foi empregada uma Máquina de Ensaio de Tração/ Compressão EMIC – DL 30000, localizada no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP. O treinamento de operação da máquina foi coordenado pelo técnico Hall Tecnológico, o Sr. Rubens, bem como pelo professor Dr. Ronald Lesley Plaut. A capacidade máxima de carregamento da máquina é de 300kN. Acoplado à máquina de ensaio, fez-se uso do software TESC (Vmaq.) cujo manual se encontra nos anexos. No TESC foi implementada uma rotina de trabalho para a máquina de ensaios.



Figura 6 – Máquina de ensaios EMIC – DL 30000 com carregamento máximo de 300KN

#### **4.3 Construção da Matriz de Canais Angulares Sequenciais**

Um dos pontos críticos no presente projeto foi a concepção da Matriz de Canais Angulares Sequenciais para realização do ensaio do processo de ECAP dada a severidade de condições de realização do mesmo (ensaio realizado a frio, elevada tensão, elevado atrito, etc).

Este tópico tem como objetivo descrever detalhadamente todas as etapas envolvidas na construção da matriz de ECAP para a realização dos ensaios. Todos os componentes constituintes da matriz são provenientes de materiais disponíveis no Hall Tecnológico do PMT.

Antes de confeccionar uma primeira matriz, alguns ensaios utilizando uma matriz que já se encontrava no Hall-Tecnológico, foram realizados. Tais ensaios foram realizados com corpos de prova em polipropileno e estão detalhados juntamente com os aspectos desta matriz no Anexo A.

A matriz protótipo foi confeccionada a partir de um bloco de aço 1045. Este foi cortado em dois e então ambas as partes foram usinadas compondo assim as duas metades de uma matriz bipartida num plano YZ que divide os canais angulares sequenciais ao meio na direção transversal, conforme mostra a Figura 7a e 7b.



Figura 7a – Matriz Protótipo bipartida



Figura 7b – Ampliação da face dos canais

Como pode ser observado pela Figura 7b, a matriz foi concebida de forma a conter tanto os canais em  $90^\circ$  como os canais em  $120^\circ$ . Foram usinados também furos para que ambas as partes fossem unidas por meio de parafusos e roscas. Os furos nesta matriz piloto foram feitos com base no critério da experiência, identificando com base nesta os pontos onde provavelmente o esforço seria mais crítico, forçando a abertura da matriz. Nestes pontos foram usinados os furos.

Dada a severidade conhecida do processo de ECAP, ensaiou-se um corpo de polipropileno, nos canais em  $90^\circ$  para constatar se a priori já existia alguma espécie de defeito crítico na construção, em virtude da baixa força envolvida na extrusão do polipropileno, fato que protegeria a matriz contra ruptura no caso de um defeito crítico.

Visto que frente ao ensaio com polipropileno, aparentemente não havia nenhuma falha óbvia de concepção, passamos tentar ensaiar corpos de prova

---

confeccionados com alumínio (liga AA5052, mesma liga alvo deste trabalho) também nos canais de 90°. Ainda em virtude dos motivos acima mencionados, com o intuito de manter a precaução quanto à ruptura da matriz, utilizamos um lubrificante (graxa de óleo mineral com lítio na composição, da marca Molykote™).

Ao final desta etapa, foi constatado que havia uma dificuldade em se extrair o corpo de prova da matriz, mesmo sendo a mesma bipartida, e mesmo fazendo emprego do lubrificante.

Constatou-se também que a linha desenhada na lateral do corpo de prova varrendo o mesmo longitudinalmente sofreu graves modificações, evidenciando o giro do material em torno do eixo longitudinal.

Este primeiro corpo de prova foi preservado para observações microestruturais preliminares, a fim de tentar observar algum indicio de refino de microestrutura. Tal foi realizado mais a título de procedimento, visto que o fato de a microestrutural sofrer refino frente a deformação plástica severa ser amplamente conhecido na literatura.

Reintroduziu-se um novo corpo de prova e realizou-se novamente o primeiro passe para este novo corpo de prova, ocorrendo os mesmos problemas ocorridos para o corpo de prova anterior. A matriz novamente permitiu a passagem de material ao longo de sua linha de partição.

Após a remoção do corpo de prova, tentou-se reintroduzi-lo no sistema para realizar mais um passe. Neste ponto, fez-se mais uma constatação importante: o corpo de prova teve sua seção transversal alterada e desta forma não podia ser reintroduzido no sistema sem que fosse usinado. Tal fato foi inicialmente atribuído a dois motivos: à recuperação que o material sofreu após sair do segundo canal angular sequencial e ao fato de que os parafusos foram insuficientes para conter a força exercida sobre a matriz, que por sua vez acabou abrindo na sua linha de

partição, permitindo que o material no corpo de prova penetrasse nesta linha. Seria impossível garantir a estabilidade dimensional da seção do tarugo desta forma. Todavia, usinou-se este corpo de prova de forma a restaurar as dimensões iniciais e realizou-se uma tentativa de segundo passe com o mesmo (nas mesmas condições do primeiro passe), seguindo um roteiro de giro nulo, ou seja, não se rotacionou o corpo de prova em relação à posição em que ele havia entrado no canal no primeiro passe. As seguintes observações foram possíveis:

- A observação do gráfico “tensão versus deformação” na interface do TESC de forma comparativa com a do primeiro passe já mostrou que o novo carregamento necessário para fazer o tarugo passar pelo canal angular era superior ao do primeiro passe.
- Encontramos novamente o mesmo problema: a matriz permitiu que o material penetrasse por entre a sua linha de partição.
- A linha desenhada no primeiro passe desapareceu completamente, seja devido ao giro, seja devido ao atrito com as paredes do canal.
- O material se partiu, apresentando uma série de pequenas rachaduras na região da curva.

Devido ao aumento do carregamento necessário para se fazer o corpo de prova passar, a matriz acabou se fraturando durante o terceiro passe.



Figura 8 - Segunda Matriz após rompimento

Rompida a matriz, adotamos os seguintes pontos para construção de uma nova matriz baseando-se no problemas encontrados:

- Reduzimos a dimensão do canal bem como do corpo de prova na tentativa de diminuir o carregamento necessário para fazer com que o corpo de prova passe pelo canal angular para, desta forma, reduzir o esforço que o mesmo exerce sobre a matriz.
- Aumentamos o ângulo  $\psi$  de arredondamento do cotovelo para facilitar a passagem do corpo de prova.
- Arredondamos a extremidade do corpo de prova que entra primeiro na matriz de maneira a diminuir o esforço inicial do corpo de prova sobre a matriz ao chegar na interseção entre os canais angulares sequenciais.
- Definimos que a nova matriz seria feita com apenas o canal angular em  $90^\circ$  de maneira a dar mais solidez ao conjunto, deixando-a mais robusta.

A nova matriz foi usinada empregando-se o mesmo material da matriz protótipo e com os mesmos equipamentos. Também foram confeccionados corpos de prova de acordo com as novas dimensões da seção do canal empregando a mesma liga de alumínio descrita AA5052 descrita anteriormente.

Infelizmente, a matriz novamente passou a apresentar problemas. Ela novamente permitiu a passagem de material ao longo de sua linha de partição, fato que, frente às novas circunstâncias de carregamento (carregamentos menores do que os apresentados no ensaios realizados na matriz piloto), permitiu concluir que o aço empregado na matriz estava se deformando e desta forma contribuindo para que o material do corpo de prova invadisse a região de partição da matriz. Constatou-se que se precisaria de um aço mais duro. Novamente, após poucos ensaios, a matriz se rompeu novamente.

Para confecção da terceira matriz, foram adotadas as seguintes diretrizes:

- Foi decidido temperar o material da nova matriz.
- Optou-se por, nesta nova tentativa, confeccionar a matriz apenas com o canal de 90°

OBS: As dimensões desta nova matriz podem ser encontradas no Anexo E

A nova matriz adotou as novas diretrizes, porém não sofreu nitretação. Logo no primeiro ensaio, esta terceira matriz se rompeu. A hipótese inicial foi que ocorreu algum problema associado à tempera da mesma. Todavia, para uma constatação precisa, seria necessário fazer as análises devidas. Uma quarta matriz foi então projetada, porém não retornou do tratamento de tempera à tempo.

Logo, para efeito de comparação das curvas tensão deformação, a matriz protótipo foi reusinada e os ensaios nos canais de 120 e 90° foram realizados. Com relação ao modelamento matemático, adotou-se o projeto da terceira matriz que é idêntico ao da quarta matriz.

#### **4.4 Procedimento Experimental**

Todos os ensaios, tanto os preliminares como os oficiais, foram realizados à temperatura ambiente, seguindo o seguinte roteiro:

A medida das dimensões dos corpos de prova foram feitas (comprimento e lado da seção quadrada) para confirmar a dimensão inicial (considerou-se uma tolerância de até 0,05mm).

A superfície interna dos canais angulares sequenciais nas duas porções da matriz bipartida bem como os corpos de prova receberam a aplicação do lubrificante à base de graxa de óleo mineral da marca Molykote™.

As duas partes da matriz bipartida foram unidas e devidamente presas uma à outra por meio dos parafusos e porcas.

O primeiro corpo de prova foi inserido na entrada superior da matriz e em seguida foi acoplado o punção (a ferramenta de pressão) à extremidade do corpo de prova que ficou para fora da matriz.

O conjunto formado pela matriz, pelo corpo de prova e pelo punção foi posicionado e centralizado em relação ao pulsão superior da máquina.

Posicionado e centralizado o pulsão superior sobre a ferramenta e o conjunto de apoio, deu-se início ao ensaio mantendo uma pressão constante até que a condição final fosse atingida.

A configuração foi feita por meio do software controlador da máquina de ensaio, o TESC, para que a condição de parada fosse tal que o corpo de prova fosse extrudado até que a ferramenta preenchesse completamente o canal de

entrada (primeiro canal), conforme justificado no Anexo B (Construção da Matriz de Canais Angulares Sequenciais).

Para que os ensaios subsequentes ou mesmo os passes subsequentes ocorressem de maneira padronizada, a regulagem da aproximação do pulsão superior fez-se da seguinte maneira: na programação dos limites superiores e inferiores na interface do programa TESC, estabelece-se como limite superior o deslocamento zero. O indicador de força também é zerado. Coloca-se na região de trabalho o conjunto completo de matrizes e corpo de prova. Aproxima-se o pulsão superior da máquina cuidadosamente até que ocorra a primeira indicação de força. Nesse momento, anota-se o valor do deslocamento utilizando este valor como ponto de referência para todos os próximos ensaios. A força no indicador digital é zerada novamente. O sistema está pronto para a realização do ensaio.



Figura 9a – Montagem do Ferramental



Figura 9b – Montagem do Ferramental

Após a realização do primeiro ensaio, foram realizados mais dois ensaios com a finalidade de verificar a reprodutibilidade do experimento.

#### **4.5 Simulação no Qform3D**

O programa Qform (Quantor Form Ltda), foi lançado em 2002 em sua versão 3D, sendo que a versão de 1998 era a que permitia apenas ensaios em 2D (Qform 2D) e apresentava inúmeras limitações, principalmente quanto à geometria.

##### **4.5.1. Considerações Iniciais**

O programa Qform (Quantor Form Ltda), foi lançado em 2002 em sua versão 3D, sendo que a versão de 1998 era a que permitia apenas ensaios em 2D

---

(Qform 2D) e apresentava inúmeras limitações, principalmente quanto à geometria.

O primeiro passo na metodologia de uso do QForm 3D é criar os desenhos das ferramentas: Ferramenta 1 (Punção), Ferramenta 2 (Matriz) e do Workpiece (Tarugo).

Visto que o QForm 3D não possui um editor de corpos próprio, faz-se necessário utilizar um programa paralelo. O programa empregado no desenvolvimento dos sólidos utilizados neste trabalho foi o Catia V5. Poder-se-ia utilizar qualquer outro programa como o CAD por exemplo, contanto que sejam tomadas as seguintes precauções:

- O QForm precisa receber um corpo definido como “sólido”. Uma estrutura formada por linhas, mesmo que construída com um recurso do tipo “Construir a partir de um sólido” não é aceito pelo QForm 3D. Logo, o programa de edição empregado deve possuir o recurso que confere a propriedade de sólido tanto para as ferramentas e para o corpo de prova.
- O Qform 3D apresenta um problema de compatibilidade com a maioria das extensões de arquivos de corpos existentes. Apesar de o programa acusar que ele lê diversas extensões de arquivo referente aos sólidos, ele apresentará problemas como por exemplo não exibir nenhuma imagem ao se carregar o arquivo de um sólido ou exibir o sólido como se fosse formado por linhas (não como um corpo sólido). Para solucionar este problema, os arquivos dos corpos sólidos devem ser salvos no IGES, com a extensão .igs.

#### **4.5.2. Configurando o processo de conformação no QForm 3D**

Este tópico tem como objetivo guiar passo a passo a configuração/criação de um processo (“Nova Operação”) de conformação mecânica empregando as

ferramentas e o corpo de prova previamente importados. A criação se inicia por meio do clique no botão “New Operation”, assinalado na Figura 10.

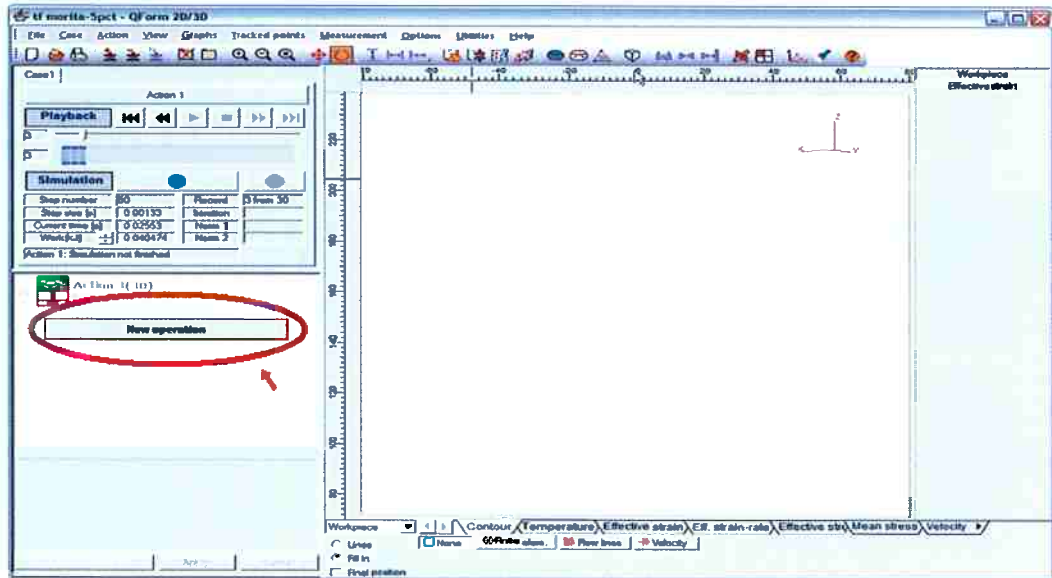


Figura 10 - Passo Inicial

#### 4.5.2.1. Passo 1: Processo

Nesta primeira etapa, escolhe-se o tipo de processo de conformação que o QForm 3D vai simular. No caso do ECAP, escolhemos “Forming in hydraulic press” (Conformação em prensa hidráulica). Em seguida, preciona-se o botão “Forward” (avançar).

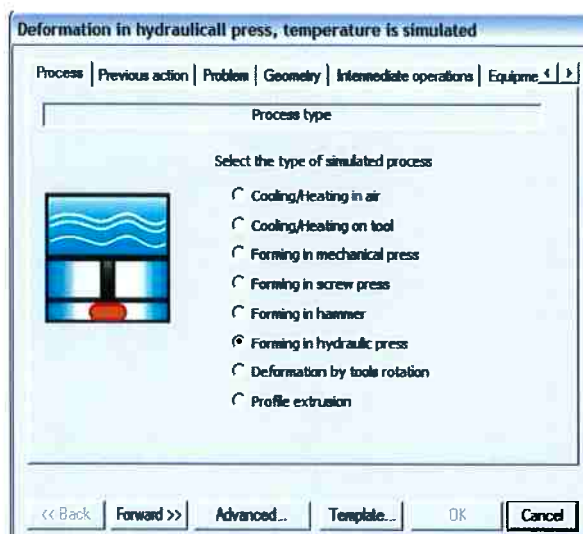


Figura 11 - Passo 1

#### 4.5.2.2. Passo 2: Ações Prévias

Nesta etapa, escolhe-se o tipo de ação prévia que o corpo de prova e as ferramentas devem executar. No caso deste trabalho, as configurações padrão são mantidas, ou seja, "Take the workpiece from previous action" para o corpo de prova e "Specify the tools in current action" para as ferramentas.

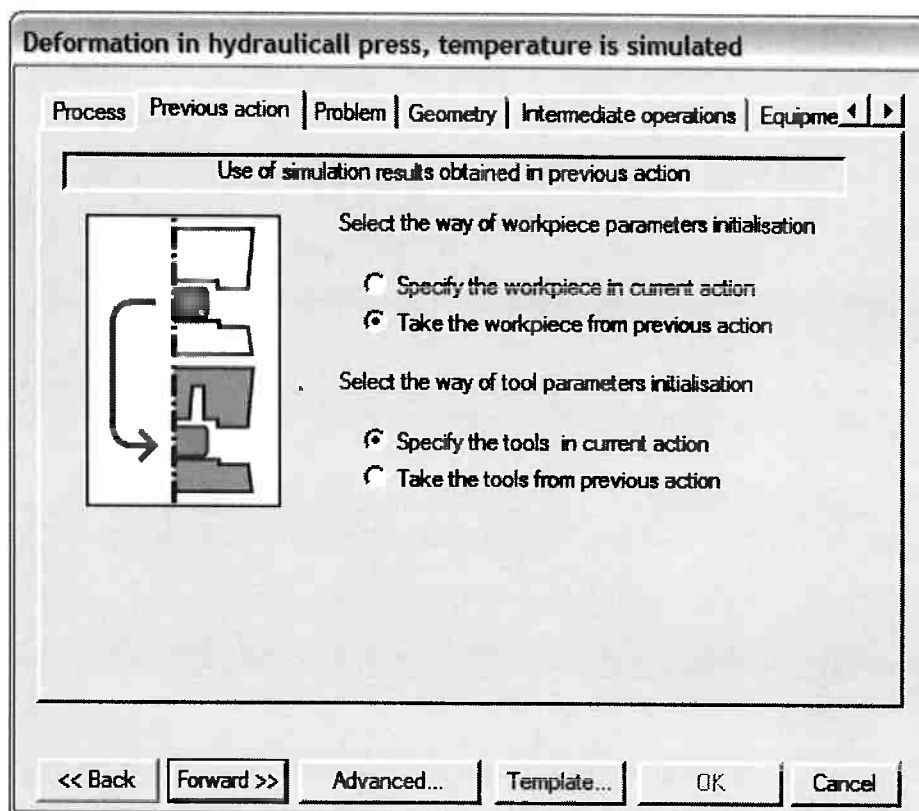


Figura 12 - Passo 2

#### 4.5.2.3. Passo 3: Tipo de problema envolvido

Decide-se aqui neste passo:

- O tipo de geometria do corpo de prova (no caso 3D);
- O tipo de problema em questão no corpo de prova (no caso, é um problema térmico e um problema de deformação plástica)

- Escolher se o programa deve ou não simular a ferramenta, ou seja, as ferramentas podem não ser consideradas corpos infinitamente rígidos, sendo atribuído um material às mesmas mais adiante (neste presente trabalho, simula-se a Ferramenta 2 - Matriz), para que as mesmas sejam simuladas da mesma maneira que o corpo de prova.

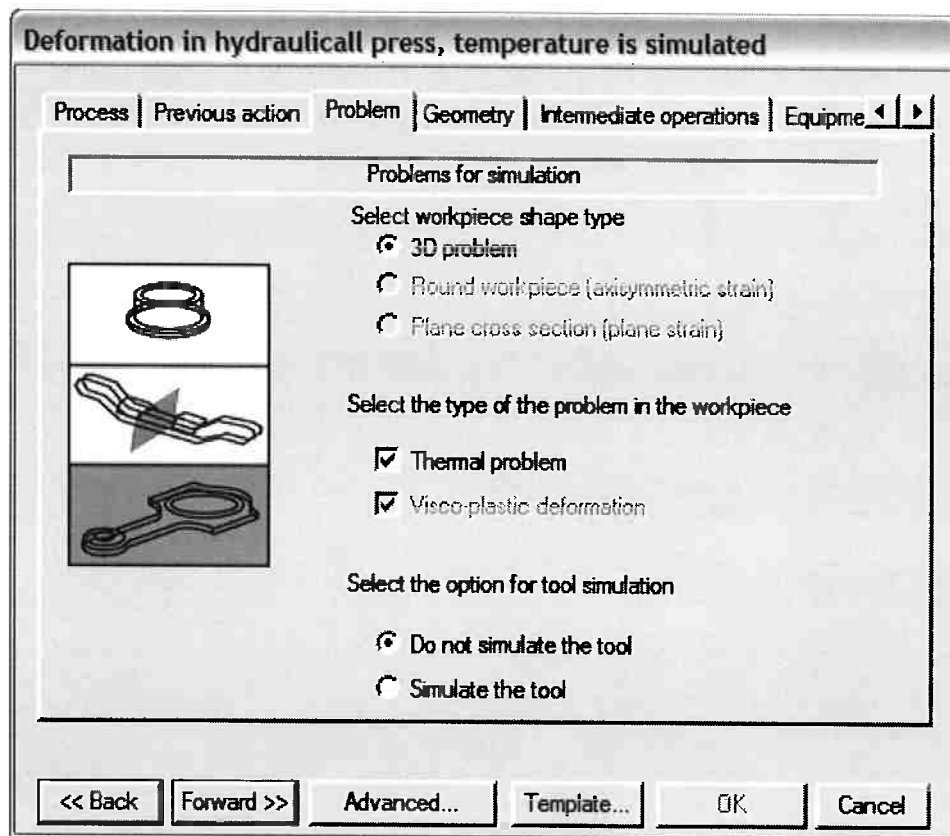


Figura 13 - Passo 3

#### 4.5.2.4. Passo 4: Geometria

Neste campo, você deve carregar o arquivo com extensão **.shl**, previamente salvo durante o processo de importação dos corpos sólidos e criado por meio do procedimento descrito no **Anexo F**. O QForm 3D grava estes arquivo no seguinte diretório padrão: C:\QForm5\Geometry. Este arquivo deve corresponder à montagem Tools/Ferramentas (Ferramenta1+Ferramenta2) e

Workpiece/Corpo de Prova (Tarugo) em um único arquivo. Tal junção dos sólidos em um único arquivo de extensão .shl é realizada durante a etapa de importação, no “3D Geometry Editor QShape”.

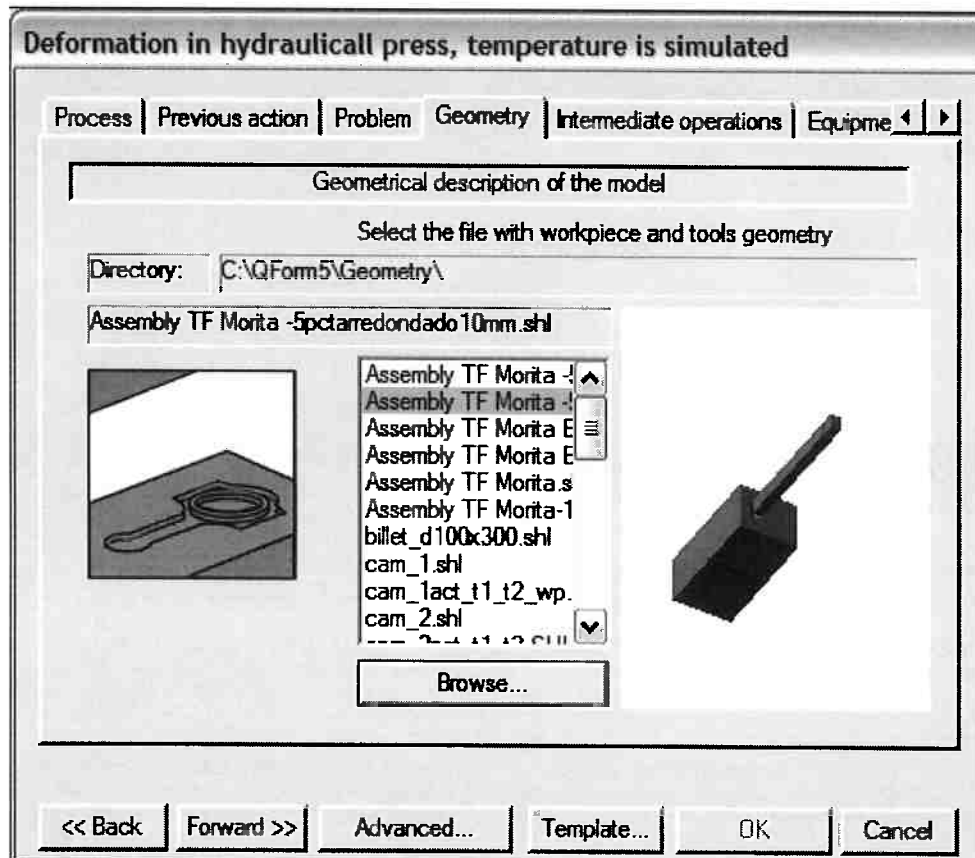


Figura 14 - Passo 4

#### 4.5.2.5. Passo 5: Operações Intermediárias

Nesta etapa é possível escolher quais operações intermediárias seriam realizadas. Durante o ensaio prático do processo de ECAP real, não foi empregada nenhuma operação intermediária, logo nenhuma delas foi selecionada para a simulação pelo programa de forma a manter a fidelidade de comparação.

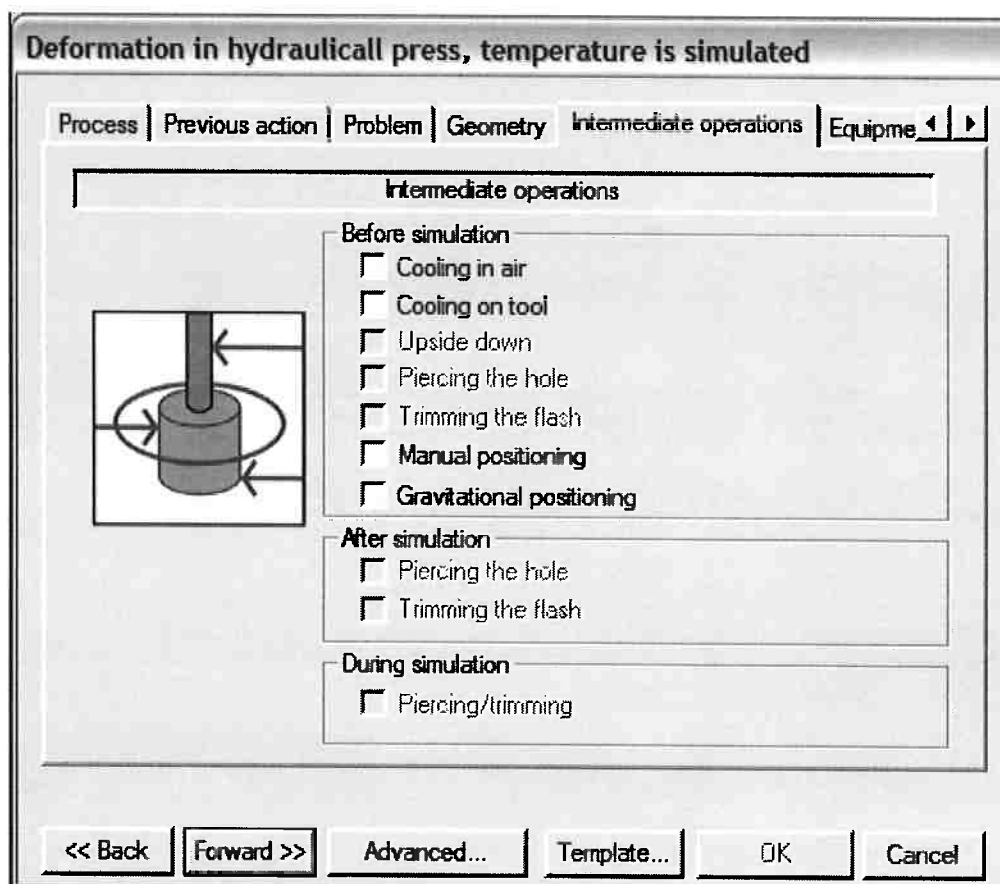


Figura 15 - Passo 5

#### 4.5.2.6. Passo 6: Equipamentos

Neste campo, podemos escolher o tipo de prensa hidráulica utilizada na simulação do processo de ECAP. Apesar de a prensa EMIC DL-30000, usada nos ensaios experimentais, possuir capacidade de 300KN, escolhemos uma prensa com capacidade bem superior 5000MN (do tipo “High speed and load”), objetivando que a capacidade da prensa não fosse um fator limitante no processo de simulação. Os detalhes de operação da prensa escolhida podem ser visualizados na Figura 16.

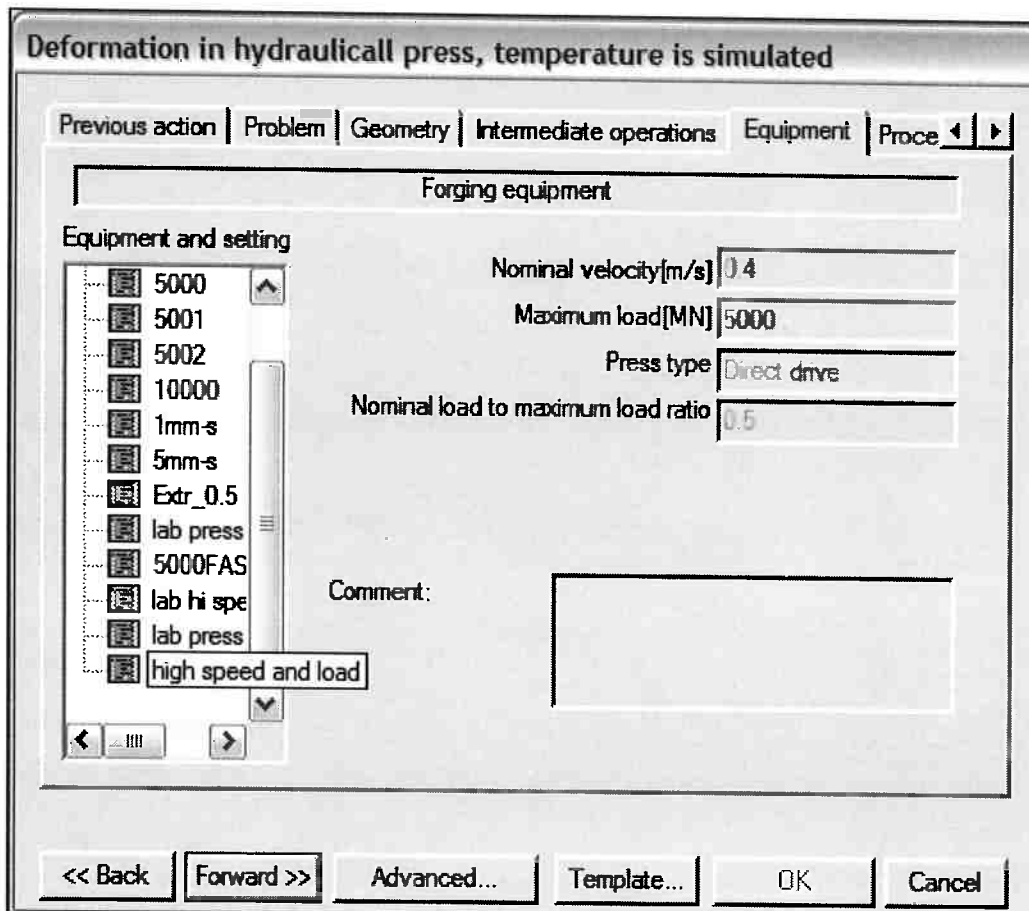


Figura 16 - Passo 6

#### 4.5.2.7. Passo 7: Parâmetros de processamento

Permite definir a que distância da ferramenta inferior ou a que distância da porção inferior de uma matriz a Ferramenta 1 (no caso o Punção) vai ter o seu curso interrompido, na situação do ensaio de ECAP. Ele foi definido em uma distância de 2mm, porque uma vez que o ensaio não se completa, não vai fazer diferença. Porém, caso o ensaio fosse levado até o fim, seria necessário defini-lo como igual à espessura do segundo canal angular sequencial.

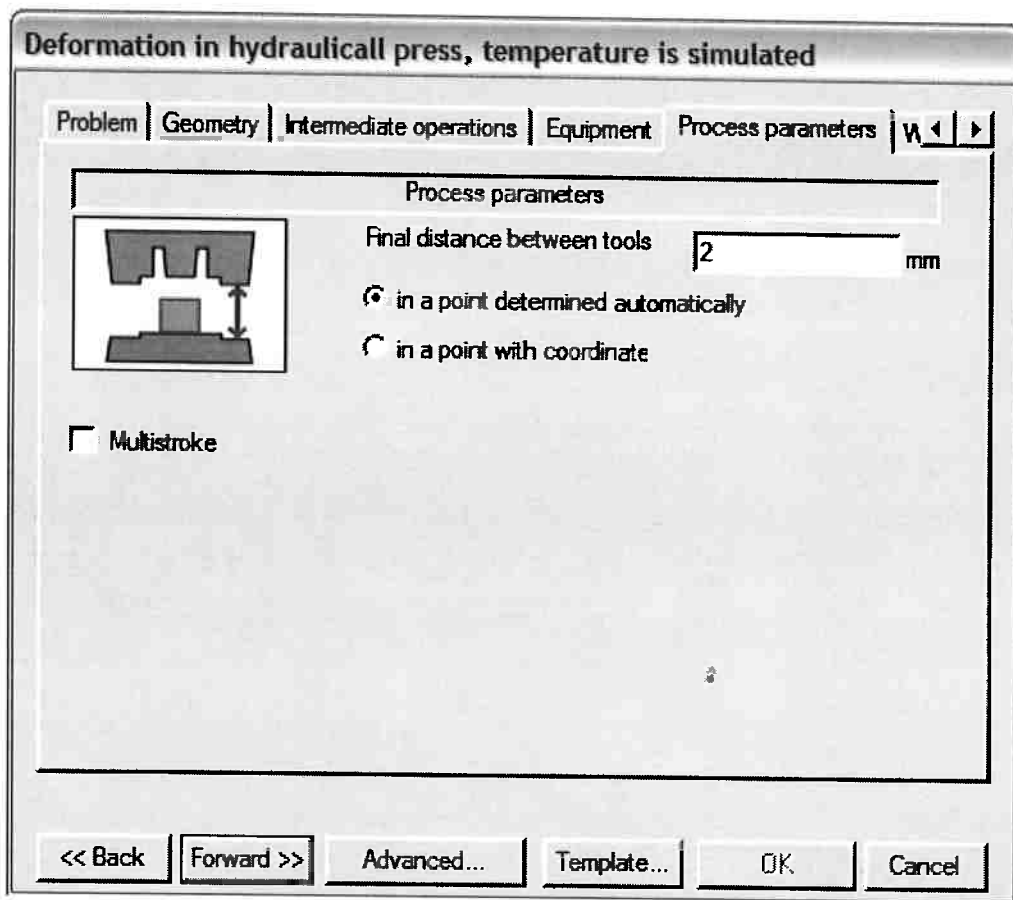


Figura 17 - Passo 7

#### 4.5.2.8. Passo 8: Parâmetros do corpo de prova

Neste campo, podemos definir:

- A temperatura do corpo de prova (tomada como 23°C – temperatura ambiente)
- O material do corpo de prova (tomado como uma liga AA5052 de alumínio à temperatura ambiente, igual à dos corpos de provas reais ensaiados)

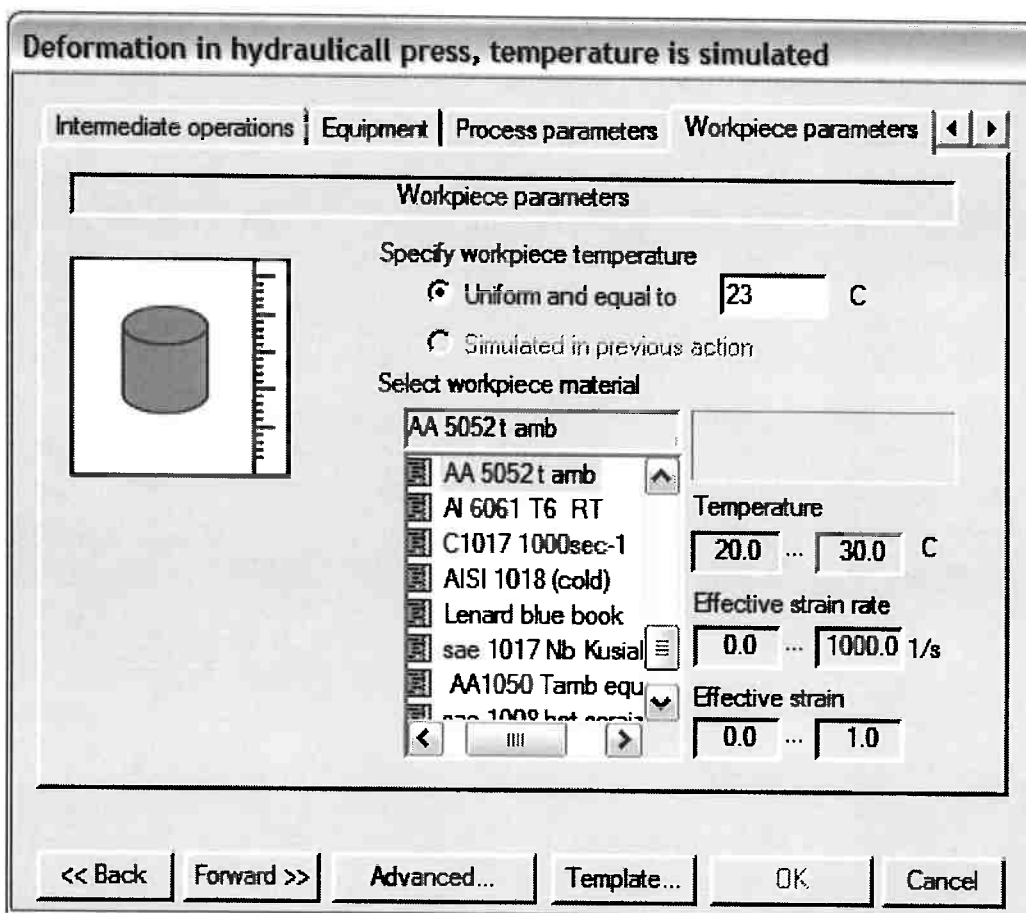


Figura 18 - Passo 8

#### 4.5.2.8.1 Edição do Tipo de Material

Caso um material, seja do corpo de prova ou ferramentas, seja de lubrificantes, não se encontre na data base do programa, eles podem ser inseridos manualmente seguindo o roteiro abaixo.

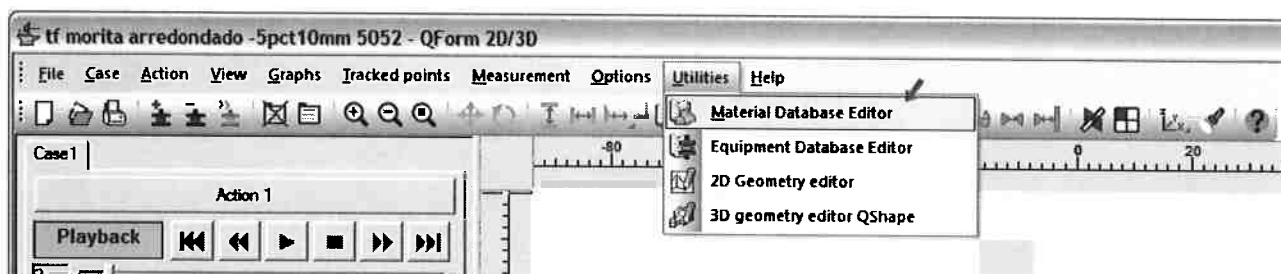


Figura 19 - Acessando o editor de material

#### 4.5.2.8.1.1 Cálculo do parâmetro K e do parâmetro n

Visto que o material utilizado (liga de alumínio AA5052) não se encontrava na database do programa para a temperatura ambiente, foi necessário calculá-los. Tal pode ser feito se empregando a curva tensão versus deformação da liga AA5052 para a temperatura ambiente. A curva foi obtida do livro H.Tschatsch – Taschenbuch Umformtechnik (Handbook de conformação mecânica alemão). Plotando os pontos tabelados abaixo EXCEL e assinalando uma curva do tipo exponencial, esperamos obter uma expressão do tipo

$$\sigma = K \varepsilon^n$$

Equação 4 – Equação de Hollomon

onde K é o fator A e o n é o fator m2 do campo de edição mostrado na Figura X. O gráfico dos pontos plotados bem como a equação obtida pode ser observado no Gráfico 01. O Qform 3D emprega a equação d Spittel e está mostrada na Figura 20.

Function Wizard

$$\sigma = A e^{-m_1 T} \varepsilon^{m_2} e^{(-m_4 \varepsilon)} \dot{\varepsilon}^{m_3}$$

Coefficients

A	216.96	m2	0.1505	m3	0
m1	0	m4	0		

Arguments values

	Min	Max
Strain	0.002	1
Strain-rate	0.001	1000
Temperature	20	30

<< Back   Next >>   Cancel   OK

Figura 20 - Parâmetros de Tensão

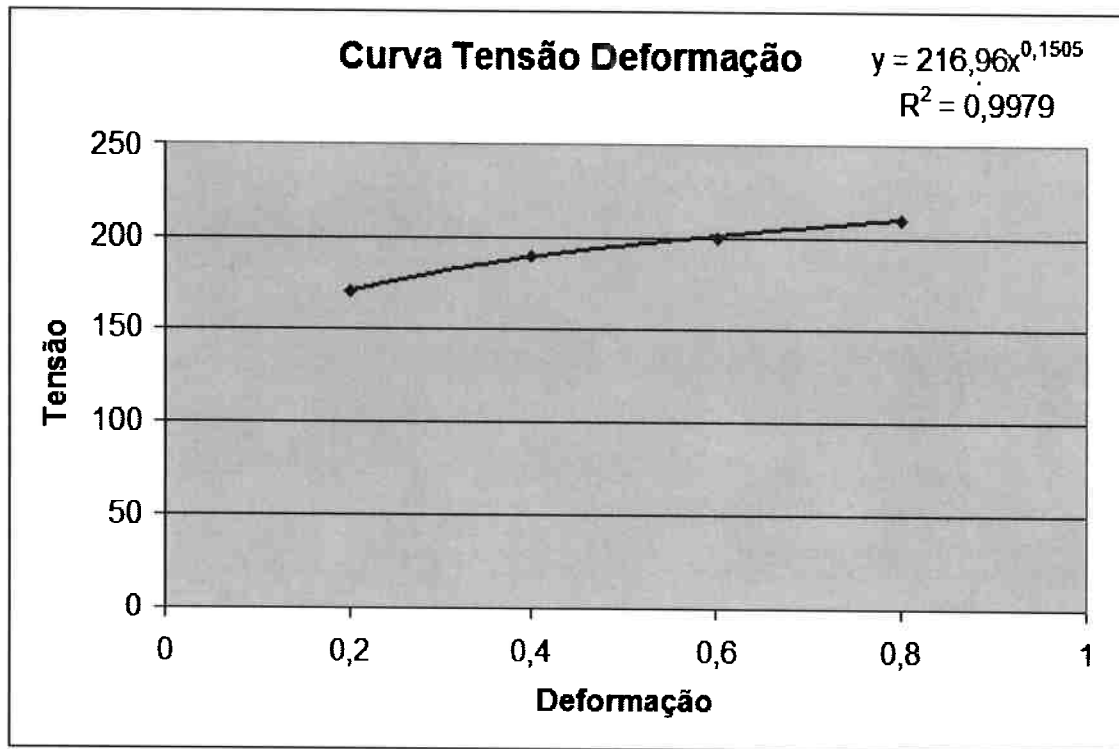


Gráfico 1 - Curva Tensão Deformação

#### 4.5.2.8.1.2 Inserindo os demais parâmetros do material

Nas abas seguintes da mesma janela de configuração de propriedades, existem os campos para preenchimento de outras propriedades do material em questão: densidade, condições térmicas, calor específico e temperatura de fusão. Para inseri-los, basta clicar no campo assinalado na Figura 21 e inserir o valor desejado. A alteração pode ser realizada de maneira análoga para todas as propriedades.

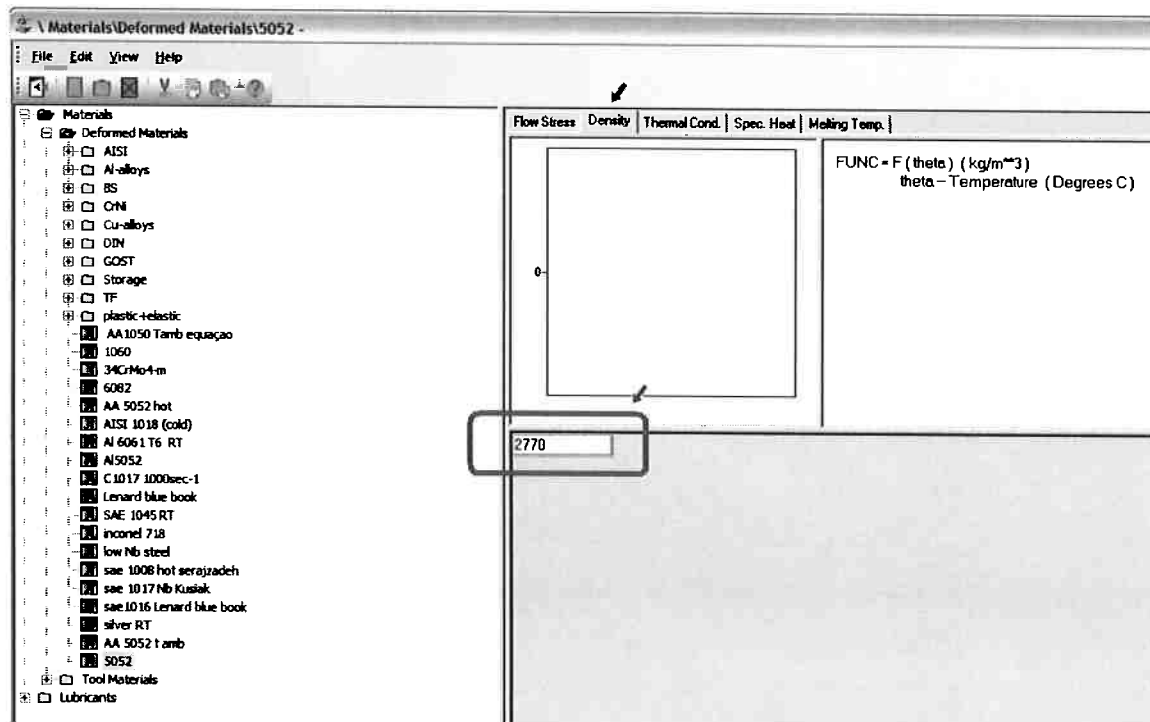


Figura 21 - Inserindo Outros Parâmetros

#### 4.5.2.9. Passo 9: Parâmetros da ferramenta

Por fim, definimos:

- A temperatura de cada ferramenta (Escolhida igual à do corpo de prova – 23°C – que é a temperatura ambiente, para ambas as ferramentas)
- O lubrificante (fator de atrito) associado a cada ferramenta.
- O material de cada ferramenta (Escolhido como o H13)
- Nas opções avançada presentes neste campo, podemos selecionar a opção de rastrear determinados conjuntos de pontos ao longo do material durante o ensaio, conforme Figura 22b. Tal opção é selecionada via Configurações Avançadas ("Advanced"), conforme Figura 22b.

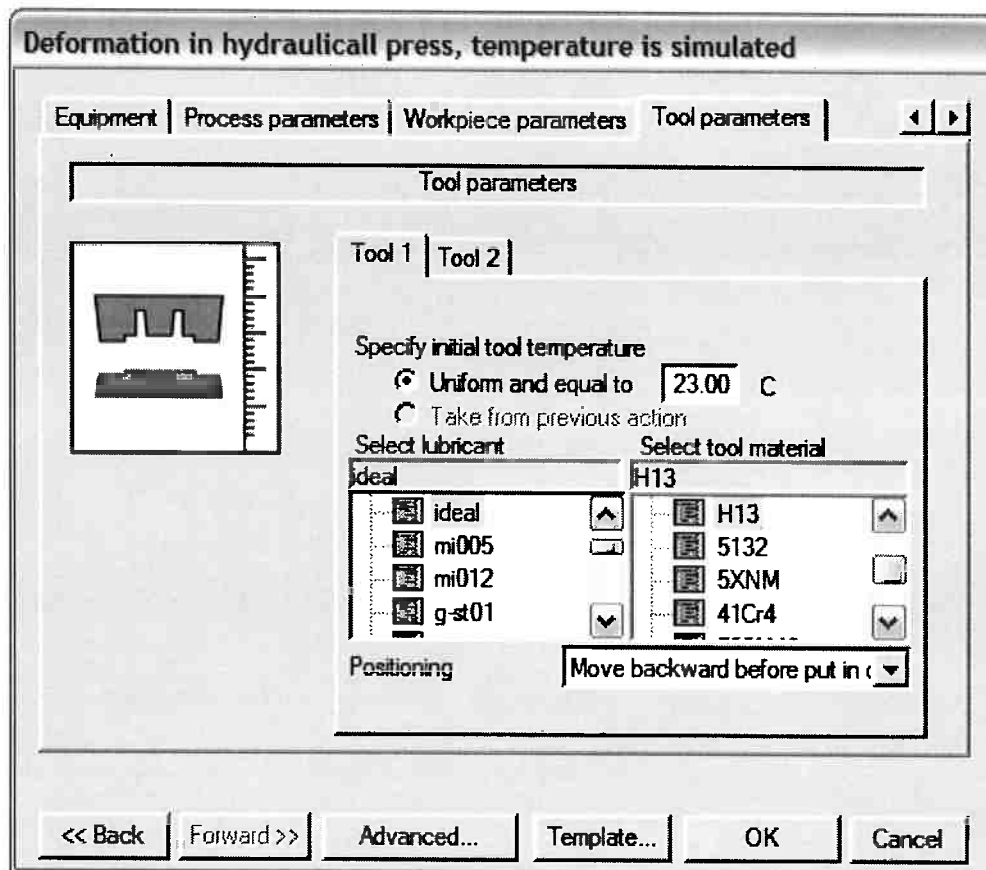


Figura 22a - Passo9a

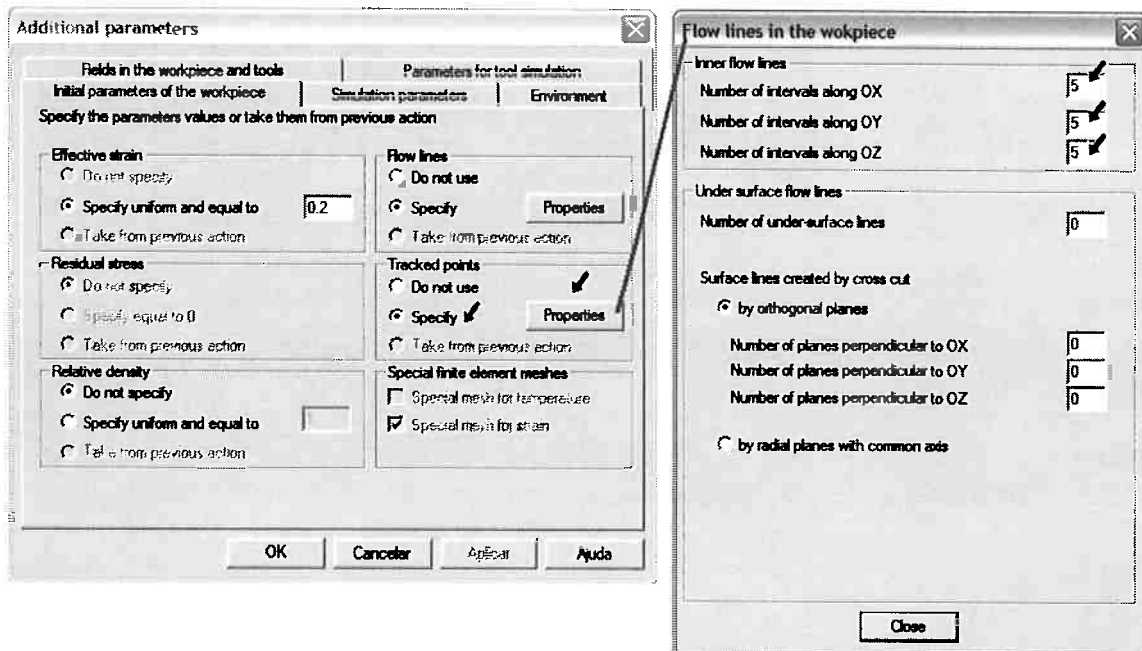


Figura 22b - Passo9b - Configurações avançadas

### 4.5.3. Simulando a Ferramenta 2 (Matriz)

Para que as condições das ferramentas possam ser simuladas também, a opção “Simulate the tool” (Simular a ferramenta) deve ser habilitada durante o Passo 3 das etapas de configuração/criação (“New Operation”).

Para dar início à simulação da ferramenta, inicialmente deve-se selecioná-la no campo assinalado na Figura 23. A ferramenta será então mostrada com suas superfícies cheias de pontos vermelhos ao se clicar no botão “Boundary conditions” (Condições de Contorno).

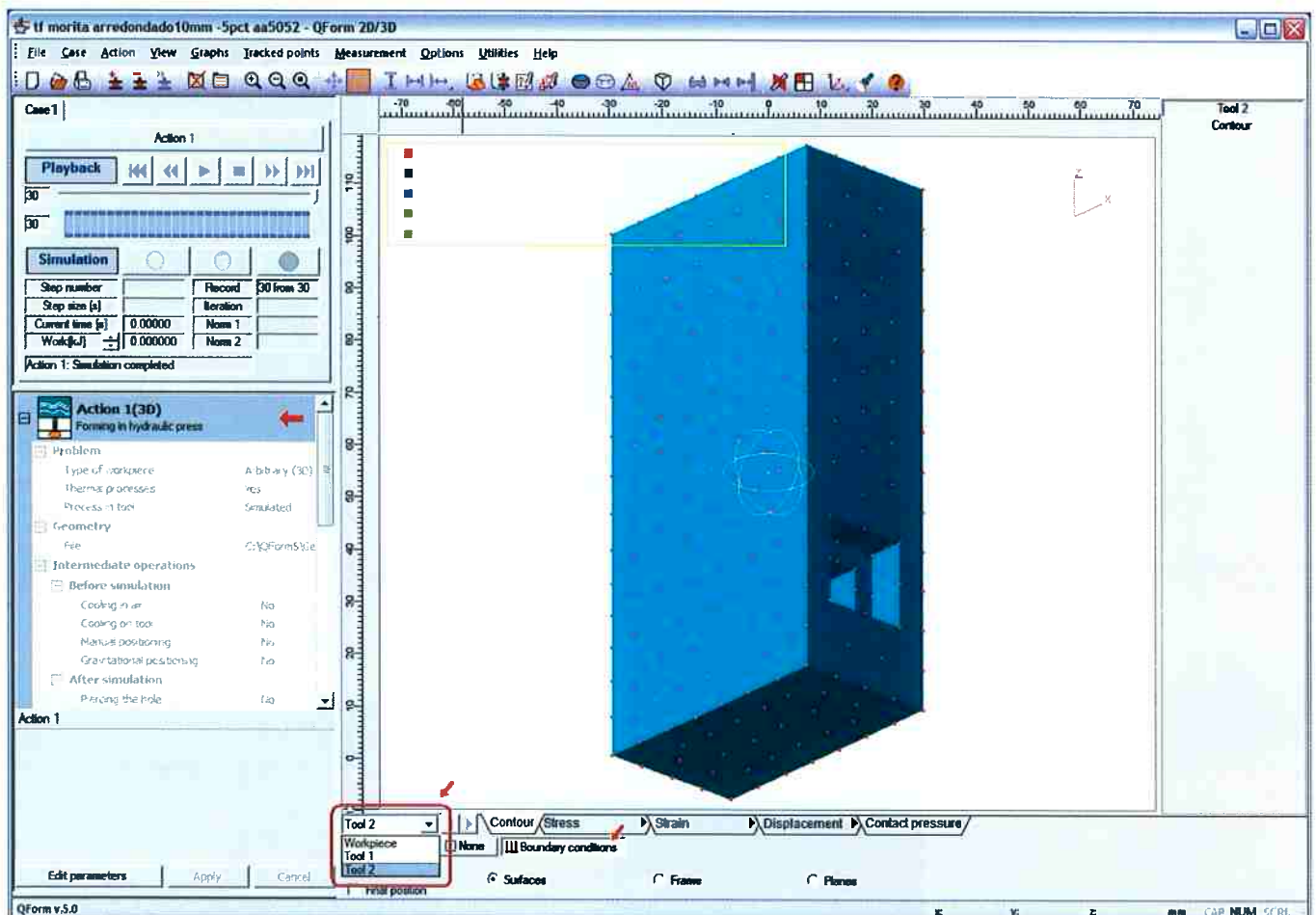


Figura 23 - Definindo condições de Contorno para a Ferramenta 2

Ao se clicar em cada superfície da ferramenta, surgirá um menu conforme a Figura 24, permitindo escolher se a superfície é:

- Uma superfície livre, sem apoio e sem atrito agindo sobre ela (“Free Surface”);
- Uma superfície apoiada sobre uma superfície rígida com contato fixo (“Support by rigid surface (fixed contact)”);
- Uma superfície apoiada sobre uma superfície rígida sem atrito com esta superfície (“Support by rigid surface (no friction)”).

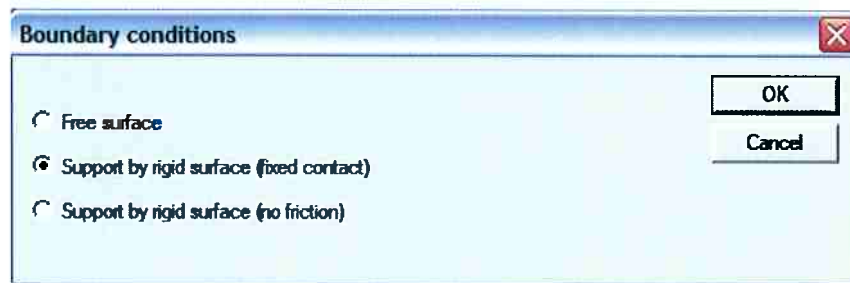


Figura 24 - Condições de contorno

No caso do ensaio do processo de ECAP, fixamos (contato fixo) apenas a superfície inferior da matriz sobre uma superfície rígida, resultando na Figura 25.

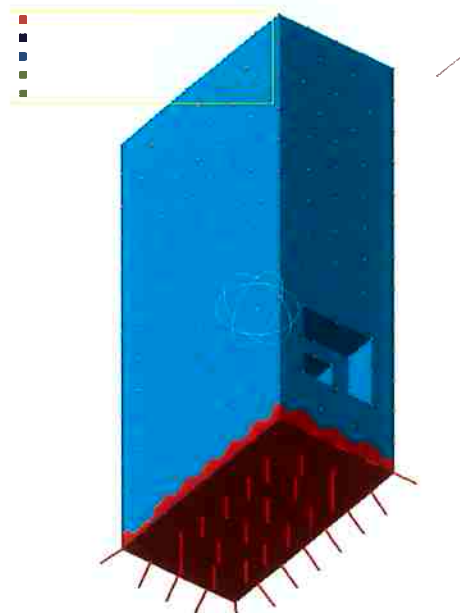


Figura 25 - Visualização das Condições de Contorno.

Ao se clicar em cada superfície da ferramenta, surgirá um menu conforme a Figura 24, permitindo escolher se a superfície é:

- Uma superfície livre, sem apoio e sem atrito agindo sobre ela (“Free Surface”);
- Uma superfície apoiada sobre uma superfície rígida com contato fixo (“Support by rigid surface (fixed contact)”);
- Uma superfície apoiada sobre uma superfície rígida sem atrito com esta superfície (“Support by rigid surface (no friction)”).

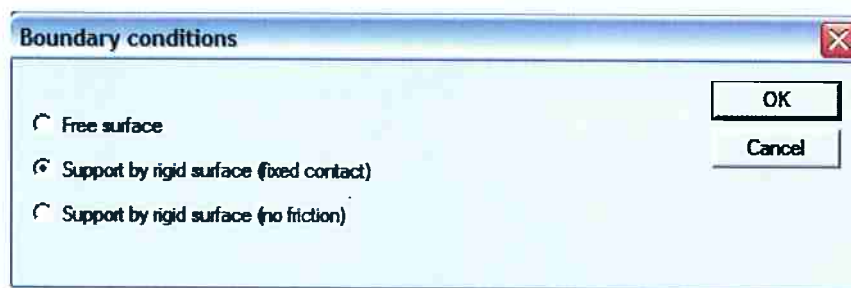


Figura 24 - Condições de contorno

No caso do ensaio do processo de ECAP, fixamos (contato fixo) apenas a superfície inferior da matriz sobre uma superfície rígida, resultando na Figura 25.

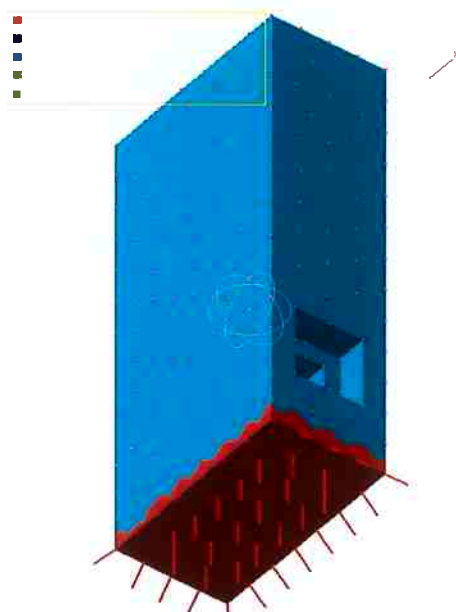


Figura 25 - Visualização das Condições de Contorno.

Definidas as condições de contorno, clica-se novamente no botão “None” e em seguida no botão de início da simulação da ferramenta, ambos assinalados na Figura 26.

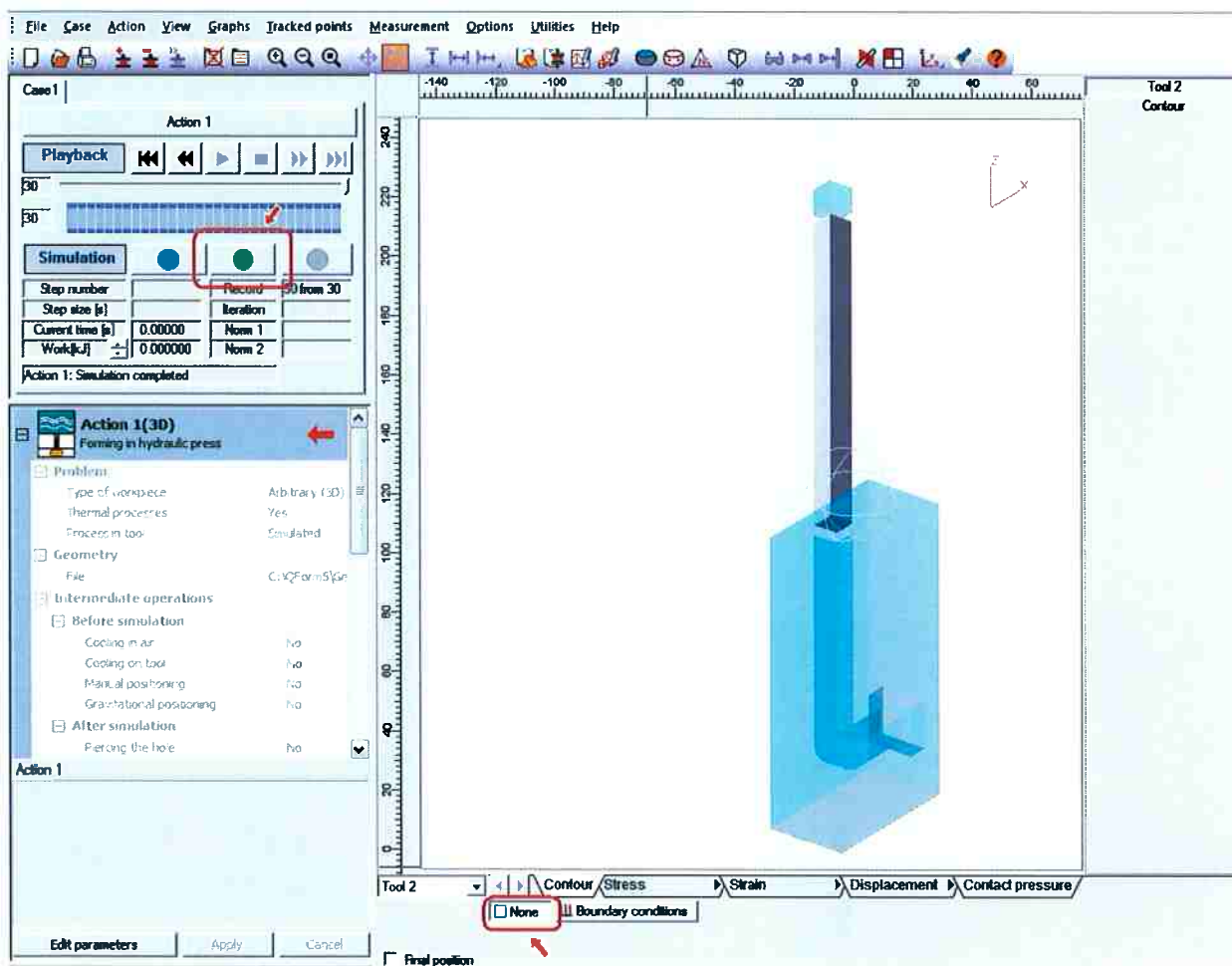


Figura 26 - Dando início à simulação da ferramenta

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Resultados do Ensaio na Máquina Elétrica de Ensaio de Compressão EMIC - DL30000

A Matriz Protótipo foi ensaiada juntamente com os corpos de prova em alumínio AA5052. Os ensaios foram realizados tanto nos canais em 120° como nos canais em 90°. Os resultados encontrados podem ser observados nos dois gráficos a seguir.

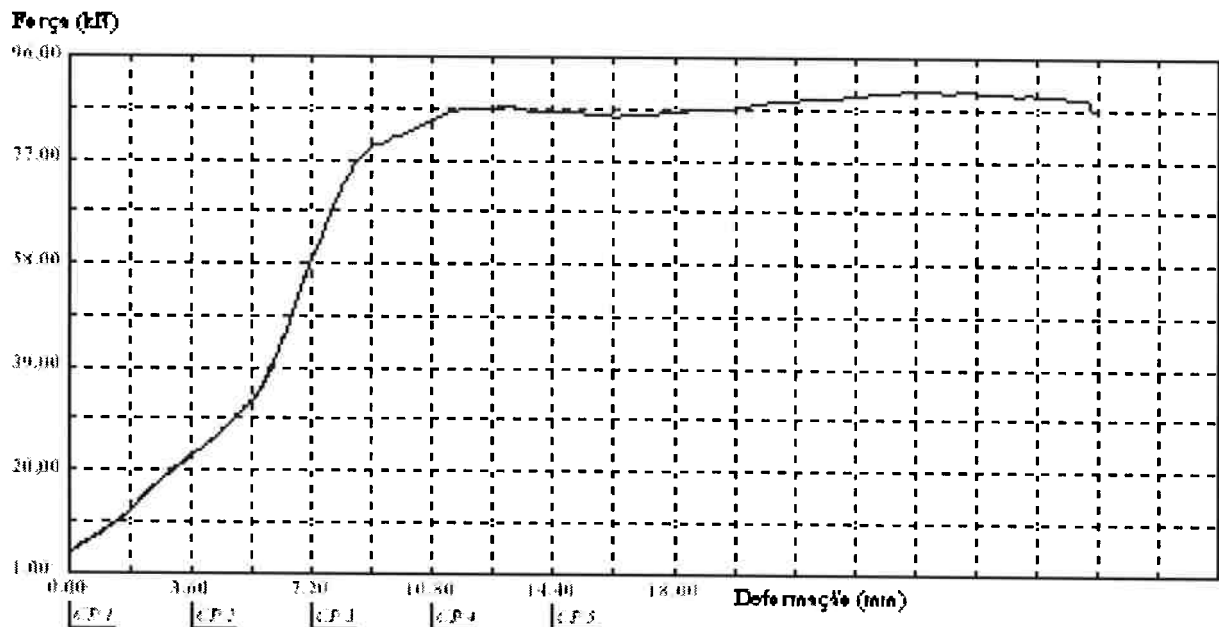


Gráfico 2 - Ensaio de alumínio AA5052 por ECAP 90° em máquina de ensaio de compressão elétrica EMIC

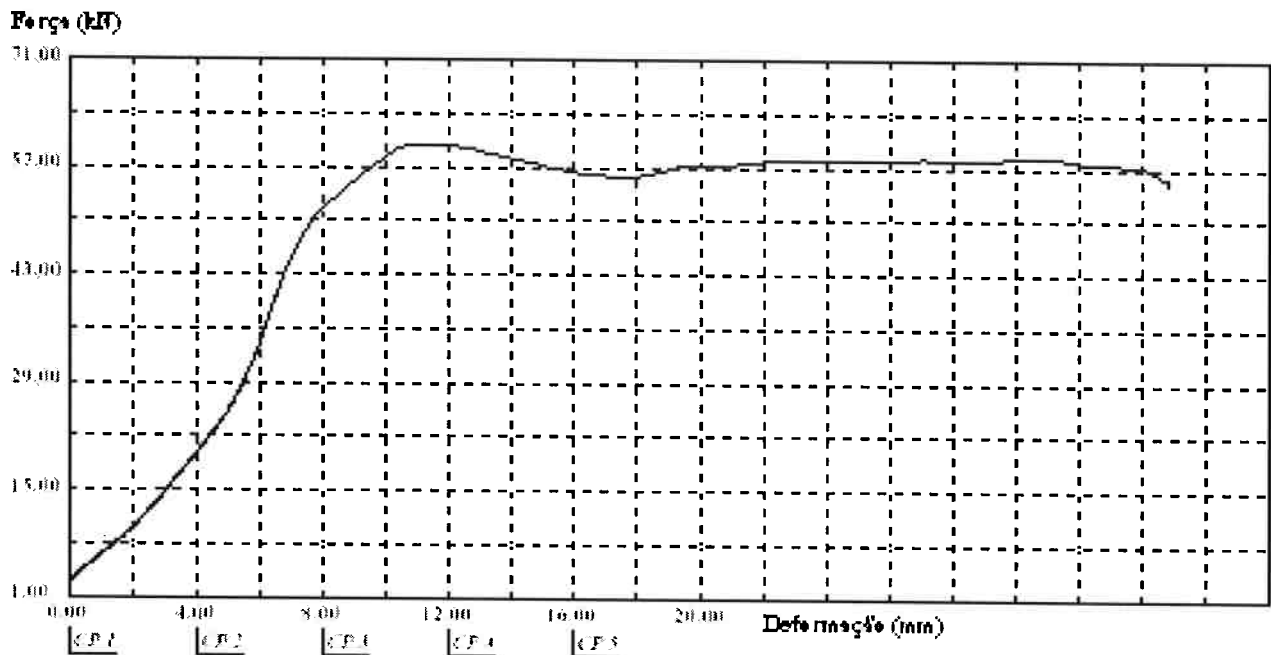


Gráfico 3 - Ensaio de alumínio AA5052 por ECAP 120° em máquina de ensaio de compressão EMIC

## 5.2. Resultados da Simulação do Corpo de Prova

A simulação foi realizada nas seguintes situações:

- Situação 1: Situação de projeto;
- Situação 2: Com ângulo de arredondamento de 4mm da extremidade inferior do corpo de prova;
- Situação 3: Com redução de volume em 1%;
- Situação 4: Com redução de volume em 5%;
- Situação 5: Com redução de volume em 5% e com ângulo de arredondamento de 10mm da extremidade inferior do corpo de prova.

Na situação 1, a simulação é interrompida muito cedo, antes de ter todas as suas etapas concluídas, devido a uma drástica flambagem do corpo de prova, como pode ser observado pela Figura 28a enquanto que o gráfico Carregamento versus Distância associado pode ser visualizado logo abaixo.

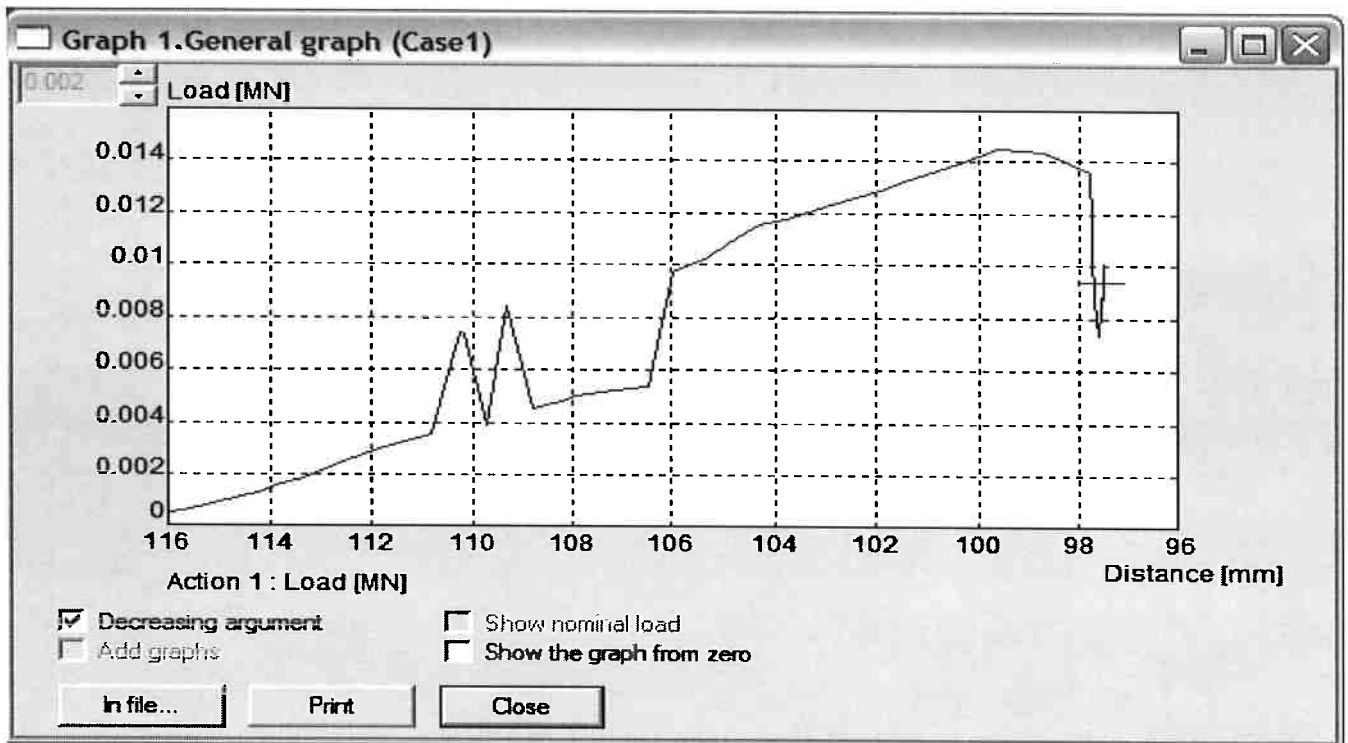


Gráfico 4 - Situação 1 (Modelamento inicial do Projeto)

Como alternativa para tentar contornar o problema que surgiu na Situação 1, adotamos a Situação 2, onde o ângulo de arredondamento conferido ao corpo de prova em uma extremidade inferior colaborou com o processo (evidenciado pelo maior avanço do corpo de prova pelos canais da matriz - Figura 28b) porém, não foi suficiente para que a simulação fosse concluída e a mesma também foi interrompida no meio devido à flambagem. Nota-se em ambos os casos, que o fator crítico não foi a insuficiência de carregamento, mas sim a flambagem do corpo de prova (tarugo) na Situação 1 e a formação de "mushroom" (cogumelo) e "shaving" (rebarba - Figura 29) na Situação 2, em ponto assinalado na Figura 28b.

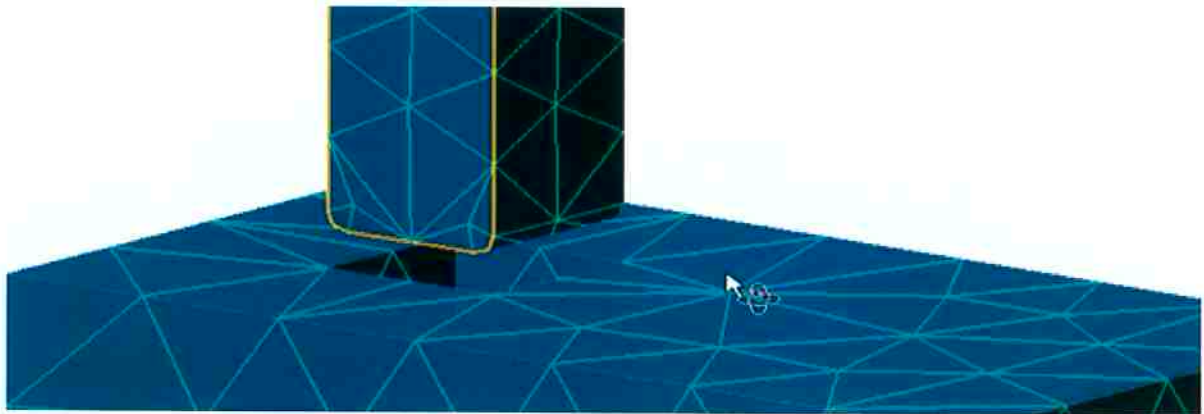


Figura 27 - Extremidade inferior arredondada na Situação 2

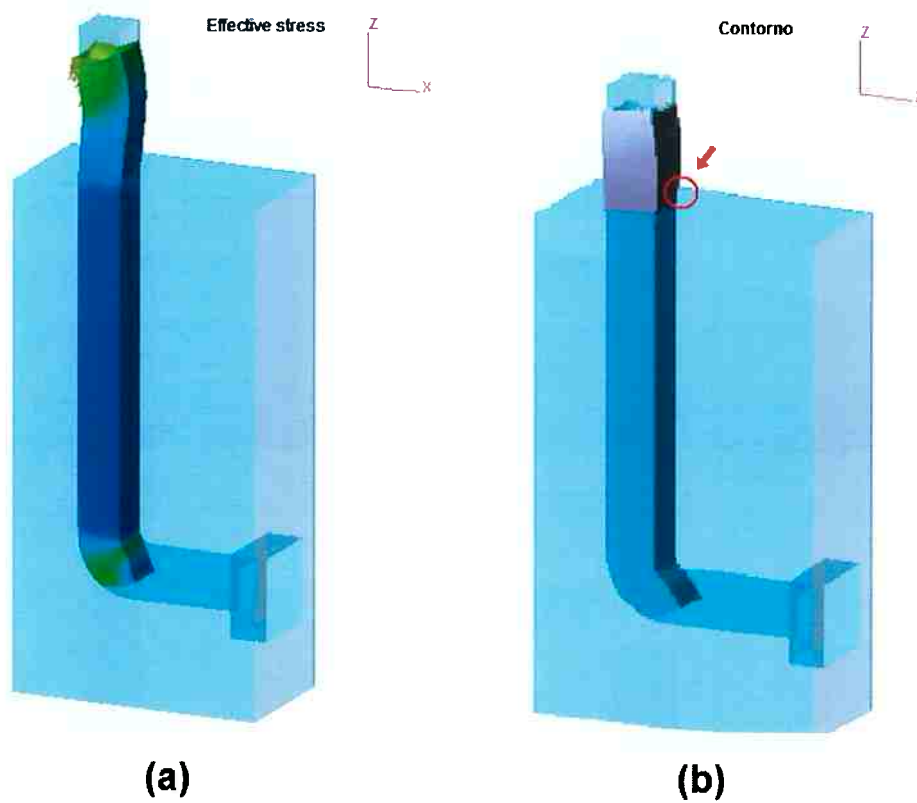


Figura 28 - Situação 1 (Projeto) e Situação 2 (com arredondamento de 4mm)

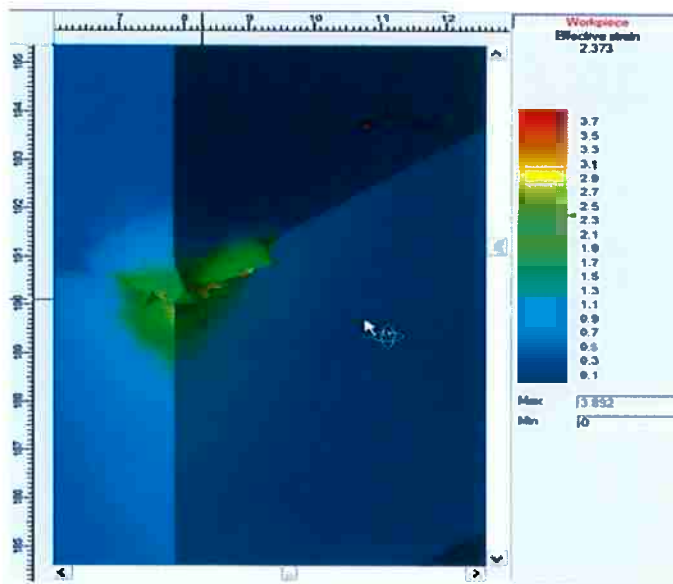


Figura 29 - Formação de Rebarba na Situação 2

O gráfico Carregamento versus Distância associado à Situação 2 (arredondamento da extremidade) pode ser observado a seguir.

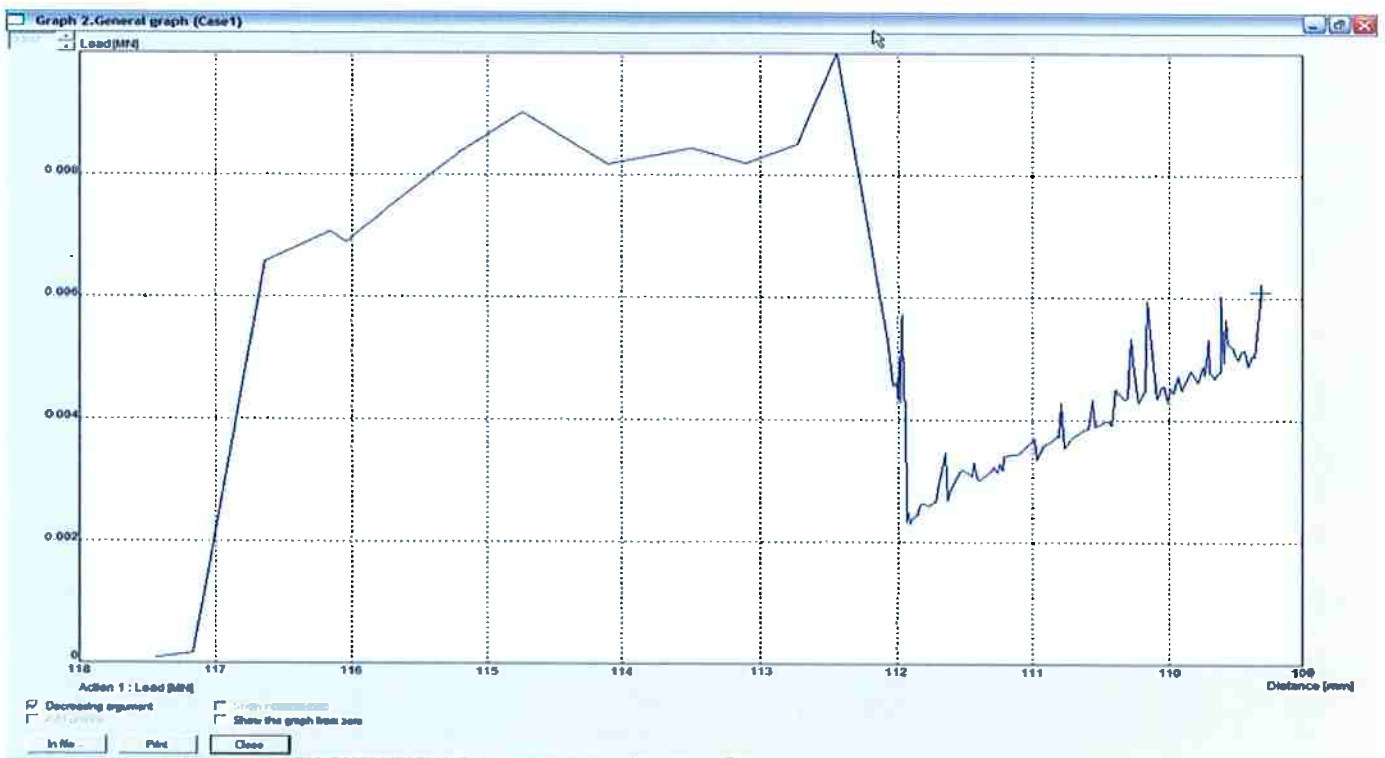


Gráfico 5 - Situação 2 - Arredondamento da extremidade inferior

Para contornar o problema da rebarba, testamos usar um certo grau de folga obtido por meio da redução das dimensões do corpo de prova. Tal redução foi obtida de forma que o volume total do mesmo foi diminuído em 1%, constituindo assim a Situação 3. Na Situação 3 o resultado encontrado foi semelhante ao encontrado para a Situação 1, com a simulação sendo interrompida também por flambagem. Acreditando que a redução tivesse provocado uma mudança desprezível, adotamos a Situação 4, onde a redução de volume empregada foi de 5%, obtendo o resultado observado na Figura 30.

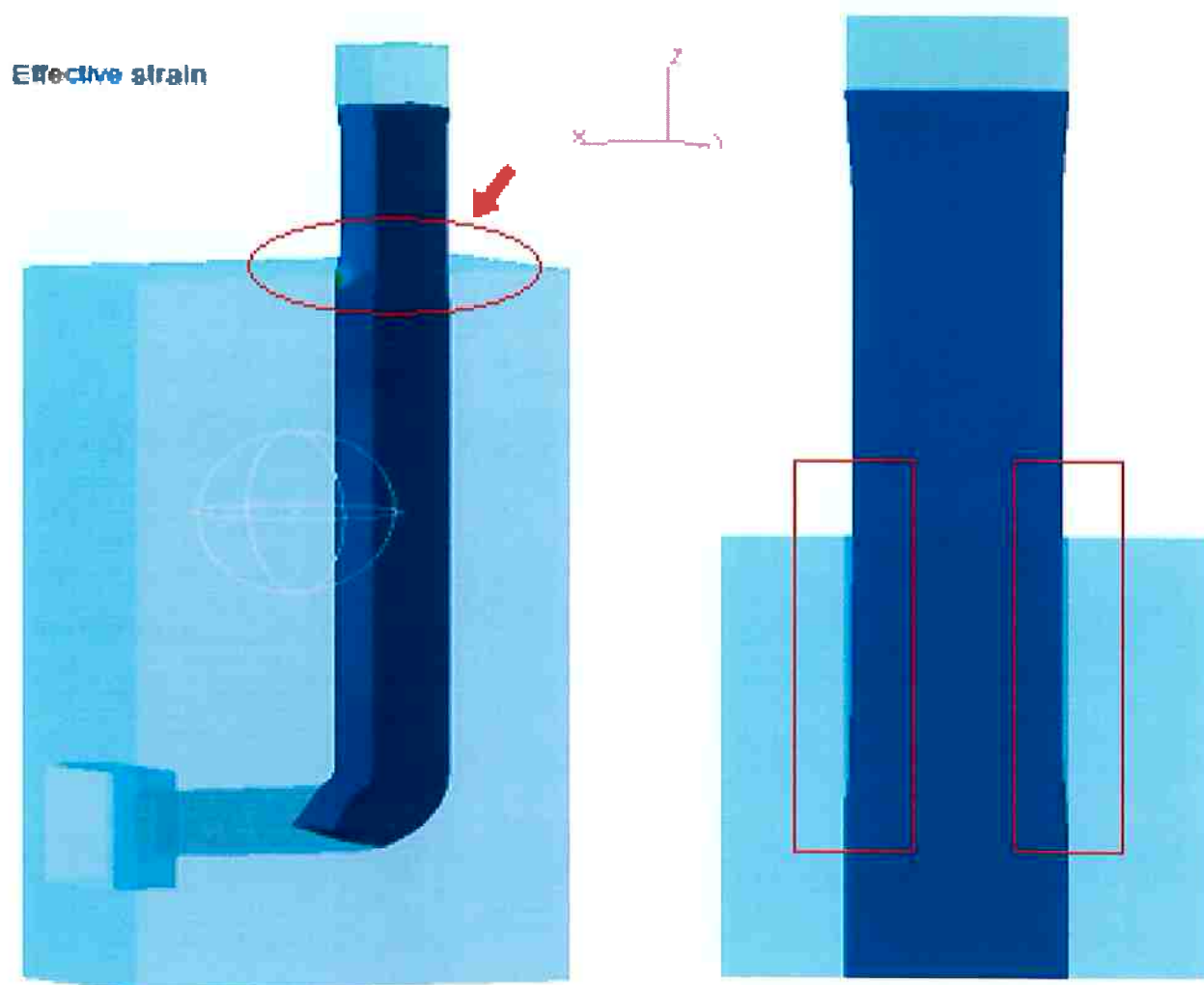


Figura 30 - Situação 4 (redução de 5% no volume)

A simulação também foi interrompida neste caso, mas por uma questão de tempo de processamento. Nota-se que não existe flabagem e que a formação do cogumelo na interface Ferramenta 1 (Punção) e Ferramenta 2 (Corpo de Prova) é bem homogênea. O problema da formação de rebarba também foi resolvido, uma vez que pode-se observar que o alargamento da seção transversal do corpo de prova devido a flambagem e a compressão praticamente só ocorrem dentro da matriz. Abaixo pode ser observado o Gráfico Força versus Distância para a Situação 4.

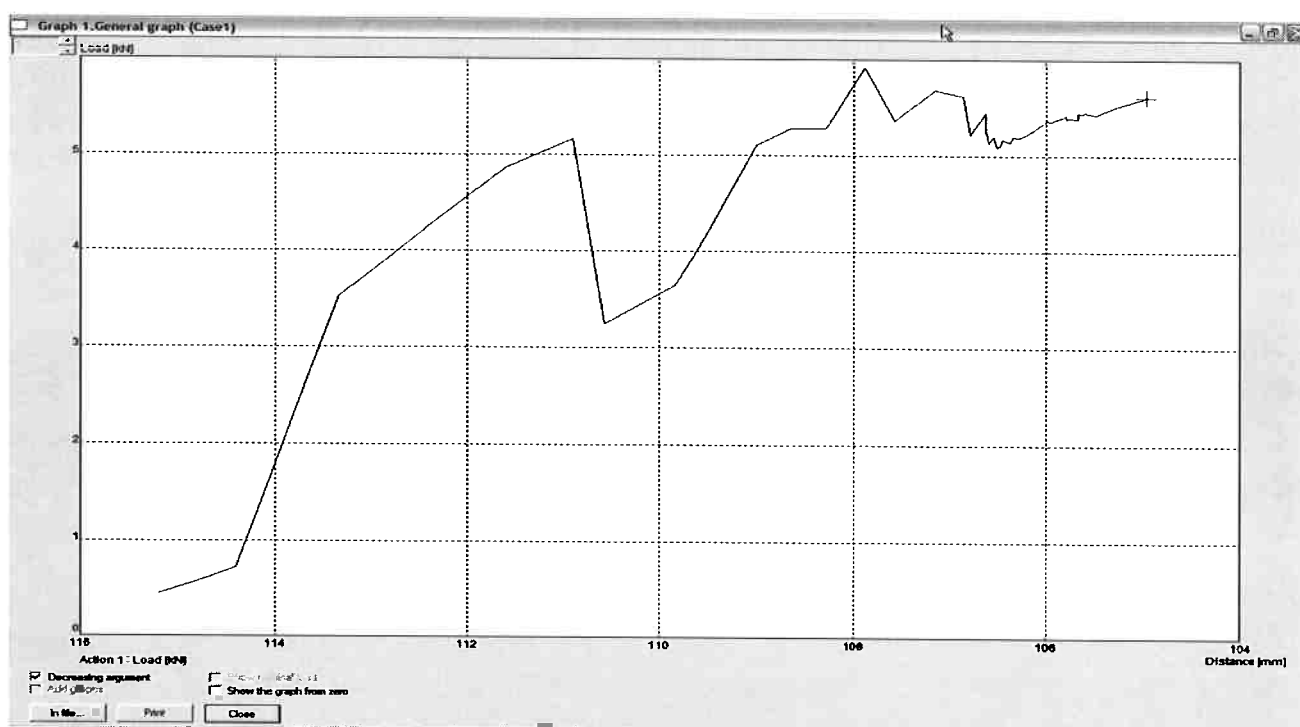


Gráfico 6 - Situação 4 (Redução de Volume em 5%)

Com a intenção de analisar os efeitos combinados, foi criada a Situação 5, onde utilizou-se ao mesmo tempo um ângulo de arredondamento da extremidade inferior do corpo de prova (10mm) e a redução de volume (em 5%) do mesmo. Sendo que o resultado pode ser observado a seguir.

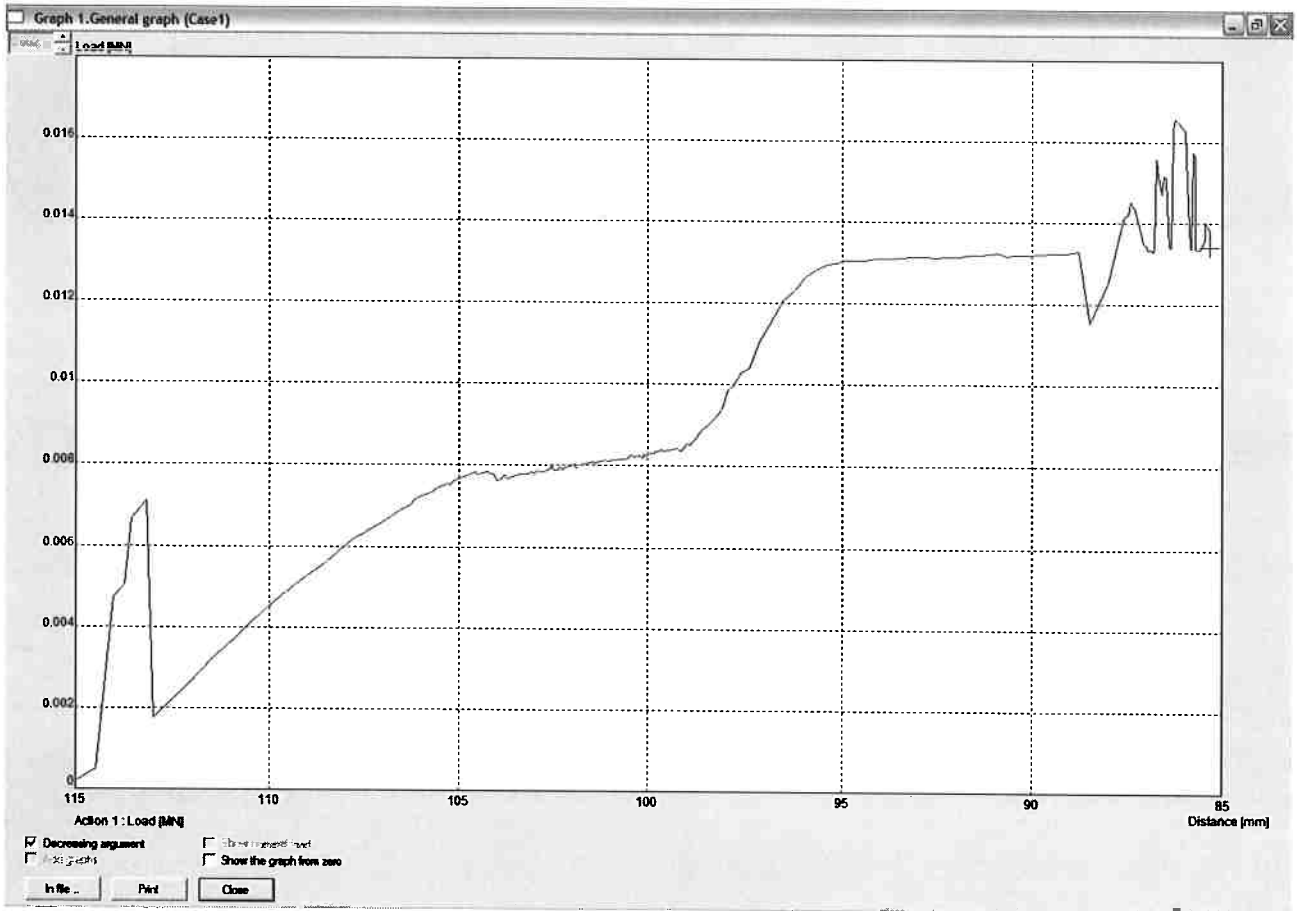


Gráfico 7 - Situação 5

QForm v.5.0.1

QuantorForm

If morita arredondado -5pct10mm s1.qfm

Action 1

### Deformação Efetiva

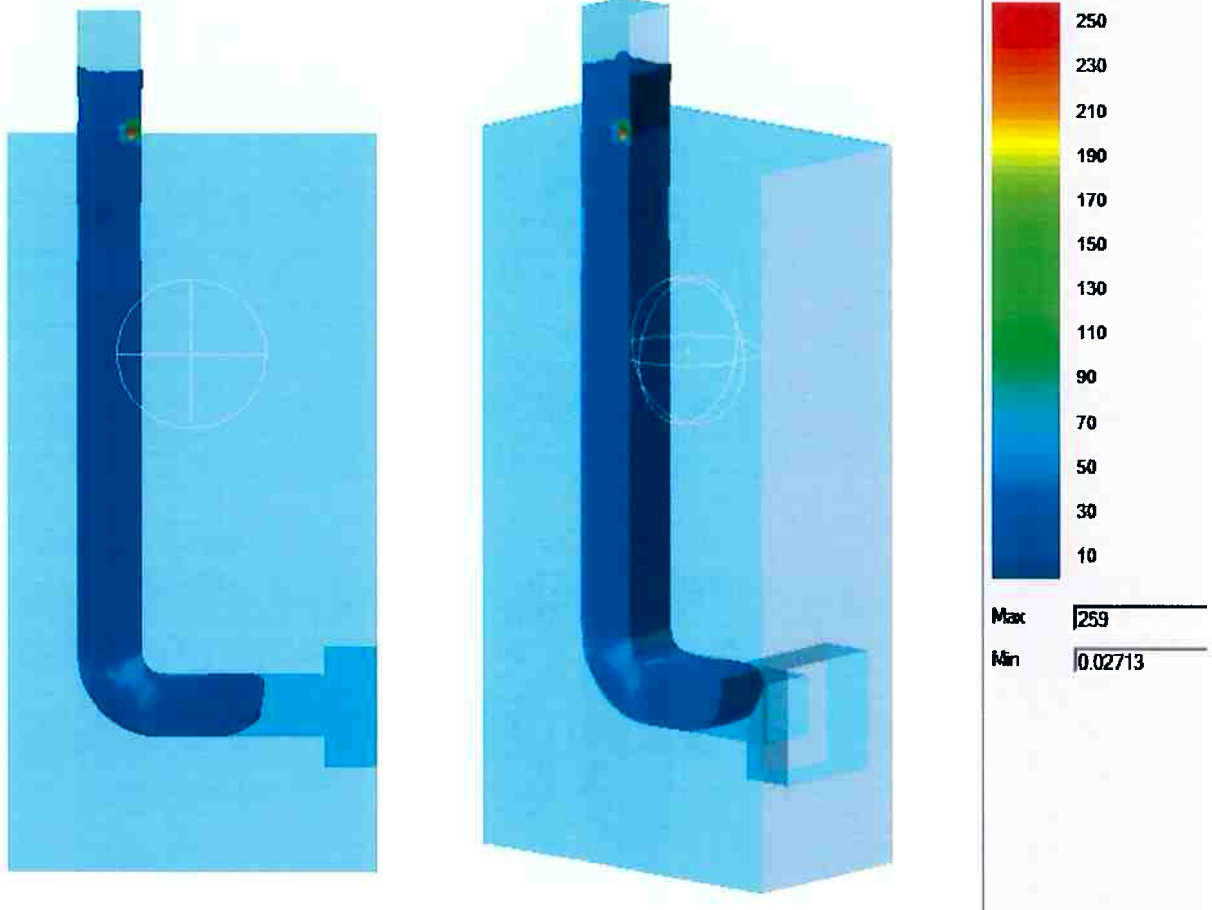


Figura 31 - Situação 5 (ângulo de arredondamento de 10mm e 5% de redução em volume)

## 6. DISCUÇÃO DOS RESULTADOS

Assim como esperado, a força para o ensaio em 120° (pico em 3KN) é inferior à necessária para o ensaio em 90° (pico em 83,0KN), conforme se pode constatar comparativamente pelo gráfico abaixo.

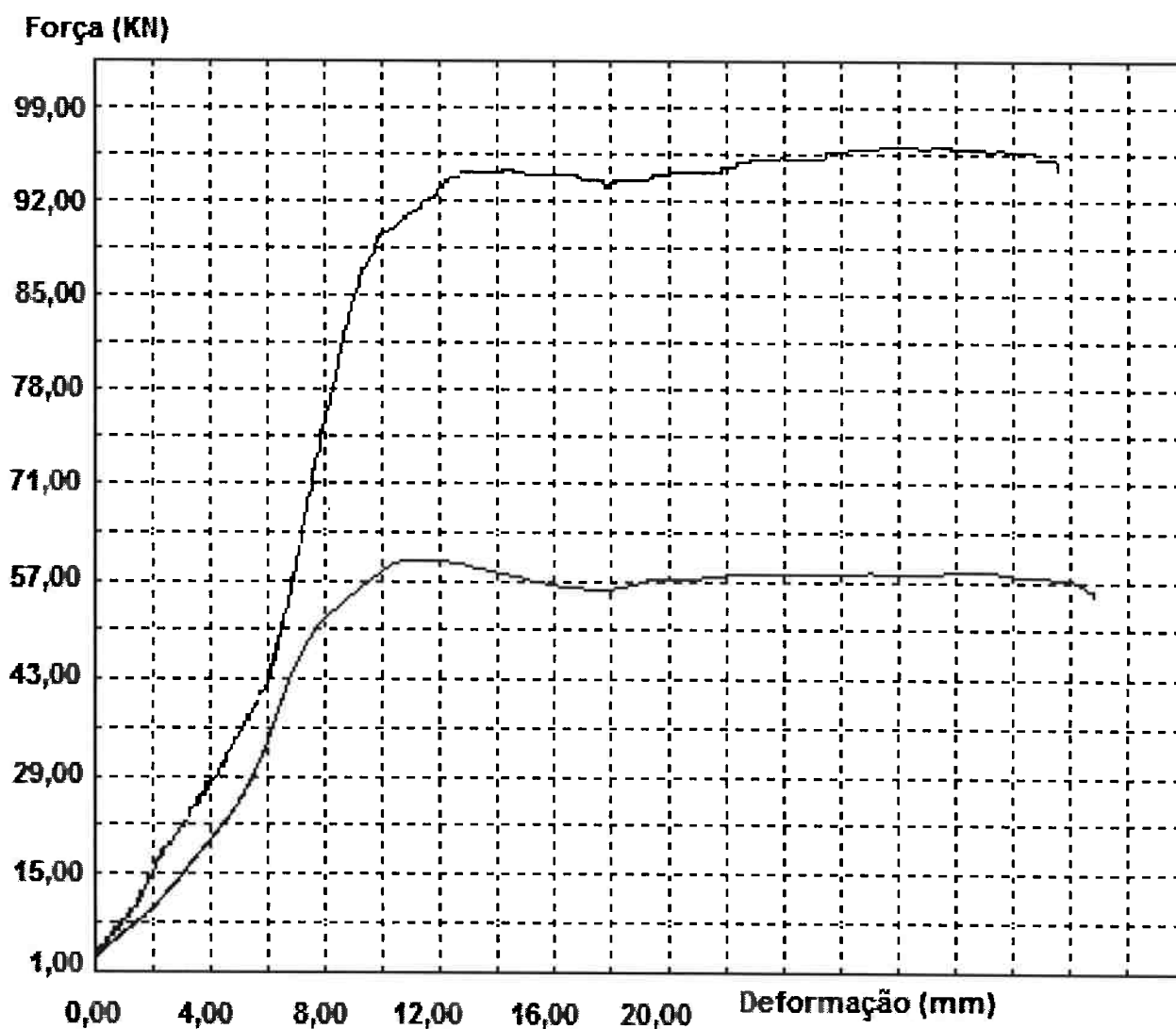


Gráfico 8: Comparação entre o ensaio em 120° e em 90°

Com relação à simulação matemática, podemos concluir que a soma dos fatores "arredondamento da extremidade que entra primeiro na matriz" e "redução de volume" são mais benéficas do que a aplicação dos mesmos isoladamente,

constituindo fatores chave na viabilização do processo de extrusão em canal angular.

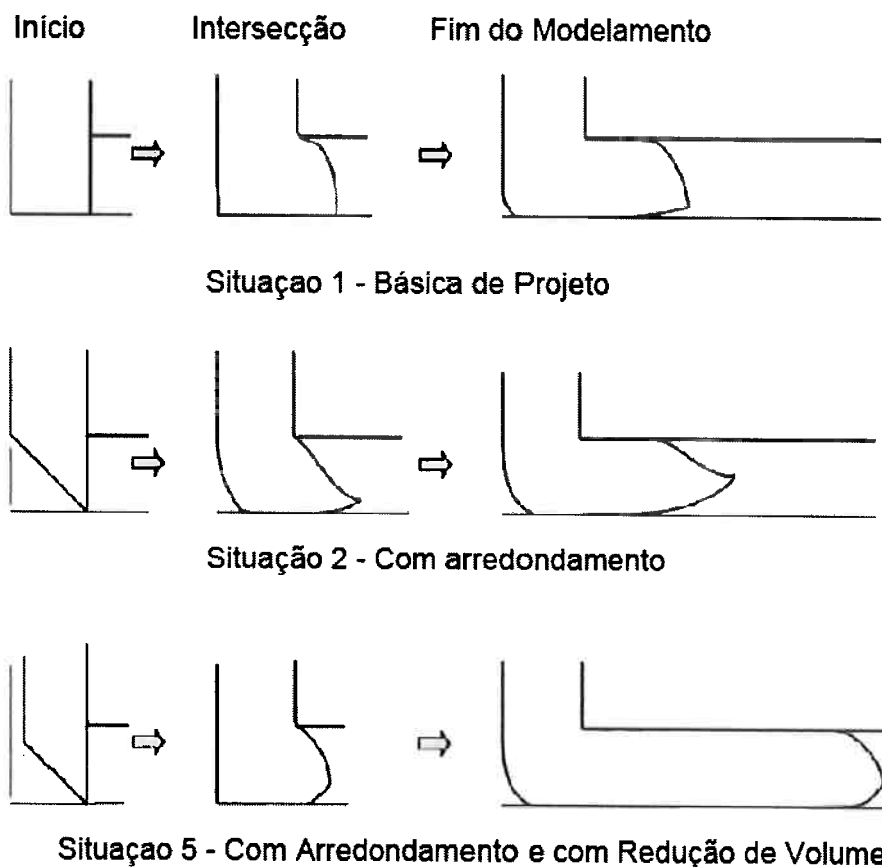


Figura 32 - Comparação de resultados

A simulação também permitiu observar os seguintes pontos interessantes:

- O material não preenche completamente os canais à medida que escoam por eles, existindo folgas e cavidades.

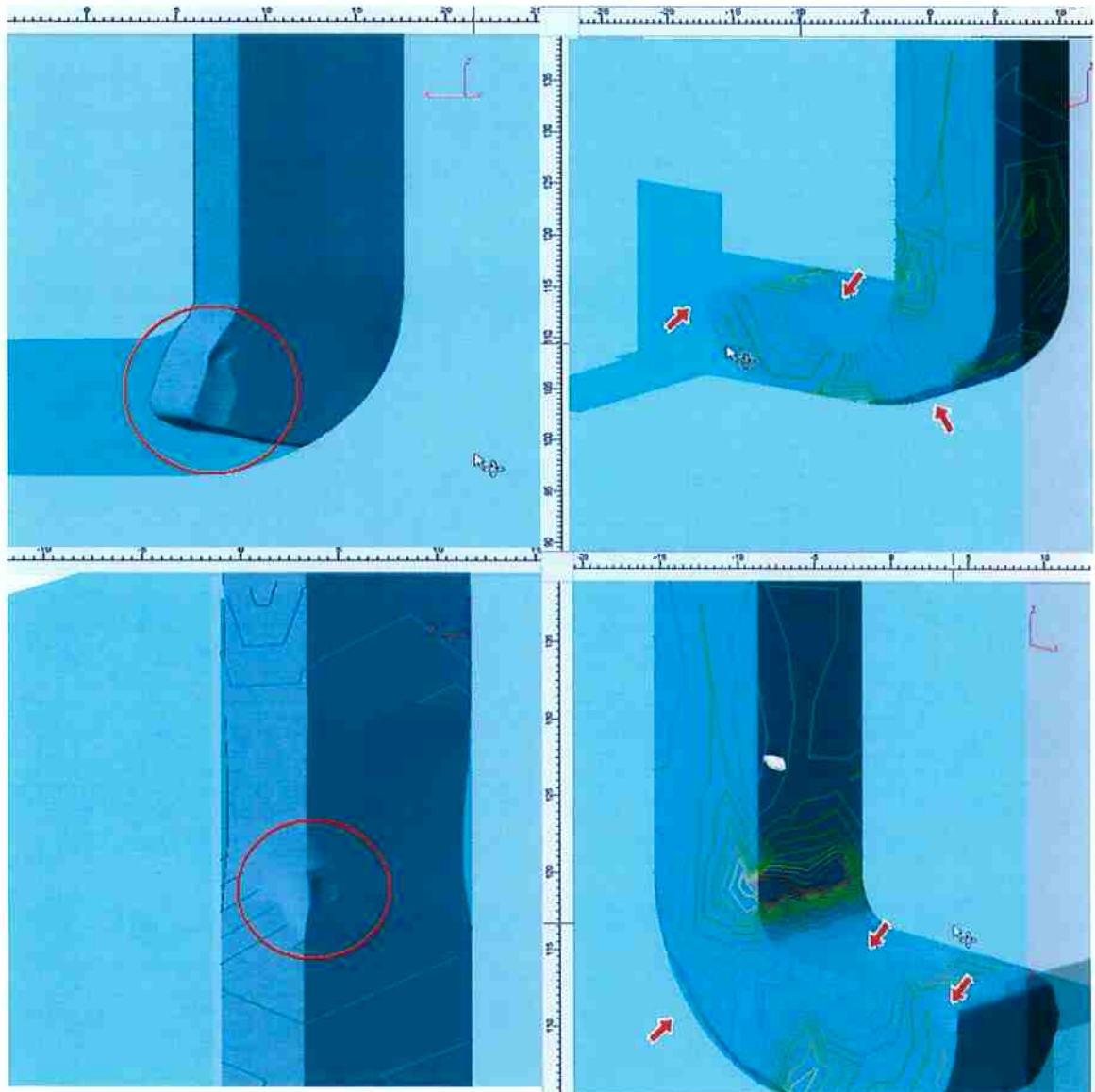


Figura 33 - Preenchimento não perfeito do canal

- A distribuição de tensões e de temperatura ao longo do material, conforme pode ser observada pela análise das imagens sequenciais ou de vídeo das etapas do processo, não é uniforme, fato relatado também na literatura.
- O rastreamento de pontos do material permitiu observar uma tendência do material a rodar ao redor da extremidade do corpo de prova.

- A taxa de deformação, a pressão de contato e tensão efetivas na Ferramenta 2 (Matriz) se concentram no pontos críticos, principalmente naqueles onde as matrizes se romperam durante os ensaios e onde houve penetração de material do corpo de prova por entre a linha de partição da matriz.

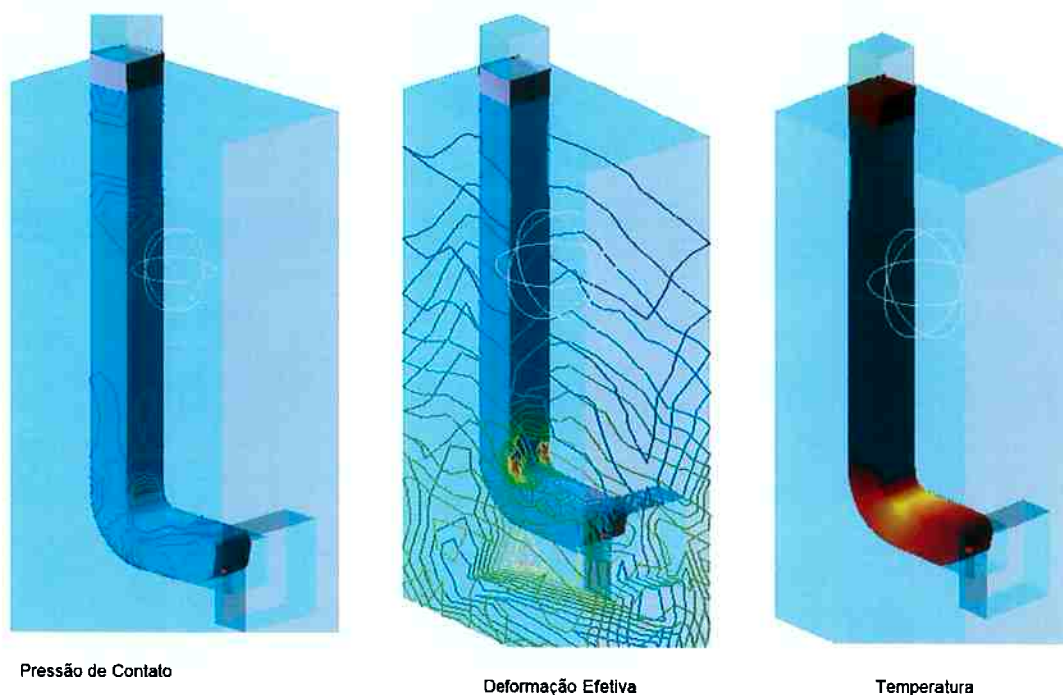


Figura 34 - Pontos Críticos

- A observação do formato das curvas (Gráfico 8) encontradas sugere que a relação de Hall-Petch talvez não seja a mais adequada para a análise da situação em questão visto que ela passa a não mais valer a partir de certo ponto. A formação de uma espécie de patamar nos gráficos evidencia isto. Uma relação que talvez se adeque melhor seja a relação de Voce. A equação de Spittel, que é a empregada pelo software Qform 3D no presente trabalho, incorpora a equação de Voce que por sua vez não é nada mais do que uma adaptação da Equação de Hollomon. Todavia, a Equação de Voce não será estudada no presente trabalho.

## 7. CONCLUSÕES

Durante comparação da simulação realizada em condições de atrito (ideal) e com atrito (com lubrificante) para o ângulo de  $90^\circ$ , fica evidente pela comparação dos gráfico Carregamento versus Distância que no ponto da simulação onde o corpo de prova chega à curva (intersecção entre os dois canais sequenciais em ângulo), que na situação com atrito (mais próxima da real), existe um pico de tensão, evidenciando uma região crítica para o processo, fato reforçado pela dificuldade de transposição de tal ponto durante a simulação na Situação 1 (de projeto). A observação dos gráficos das demais situações também permite constatar que o carregamento tem uma elevação acentuada no mesmo ponto da simulação, apesar de esta elevação não constituir-se na forma de pico, dado ao fato de nestas outras Situações o processo conseguir se desenvolver de maneira mais homogênea.

A comparação das curvas práticas com as provenientes da simulação não puderam ser comparadas de maneira satisfatória dado os imprevistos associados à confecção das matriz já mencionados anteriormente. Todavia, dois dentre três dos objetivos foram atendidos satisfatoriamente:

- A construção de uma matriz para extrusão pelo processo de Extrusão em Canal Angular Sequencial.
- A avaliação das dificuldades e problemas envolvidos na construção e a correlação com os conceitos teóricos já consolidados.

Somando estes, com o desenvolvimento realizado sobre o software para modelamento matemático (Qform 3D), apesar de não haver sido possível realizar satisfatoriamente a comparação do modelamento matemático com os ensaios práticos, todo caminho foi criado para que o mesmo seja possível a qualquer momento.

## ANEXO A – ENSAIO PRELIMINAR

Antes de construir a matriz desejada, foi realizado um ensaio numa matriz de canal angular porém uma matriz que emprega um canal angular sequencial de seção circular, e não quadrada, como a empregada nos ensaios principais deste trabalhos. A matriz de seção circular pode ser observada na figura abaixo.

Tal matriz já se encontrava no hall tecnológico e constituía aparentemente resquício de outro trabalho de formatura ou mestrado. Tal ensaio foi realizado a título de familiarização com o processo de ECAP e com a interface da Máquina de Ensaio EMIC – DL 30000.

Para os ensaios foram utilizados corpos de prova de polipropileno, os quais não exigiam carga muito elevada nem comprometiam a matriz, uma vez que o objetivo era se familiarizar com o equipamento e o processo.

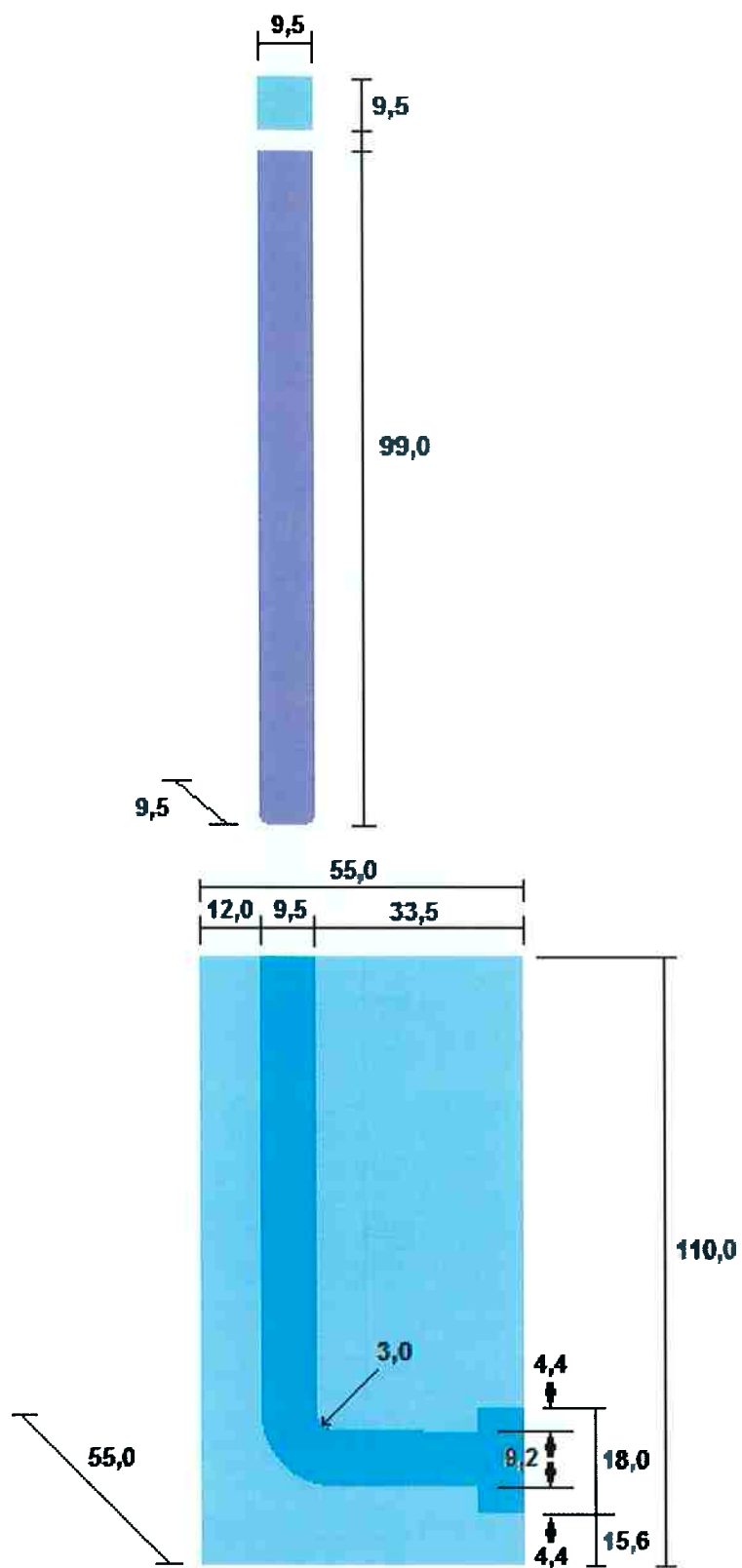








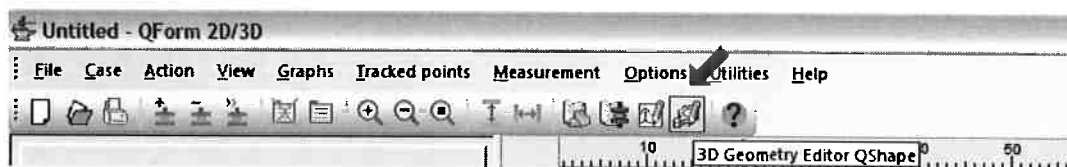
## ANEXO E – DIMENSÕES NA MONTAGEM DA MATRIZ 3



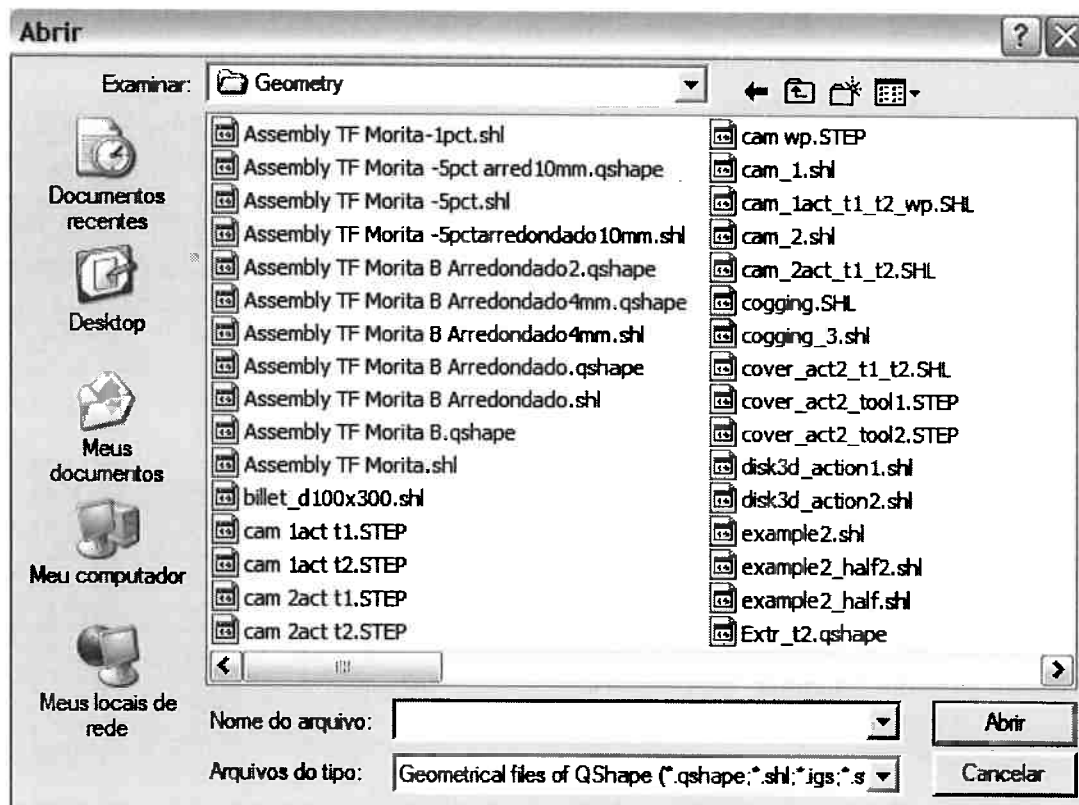
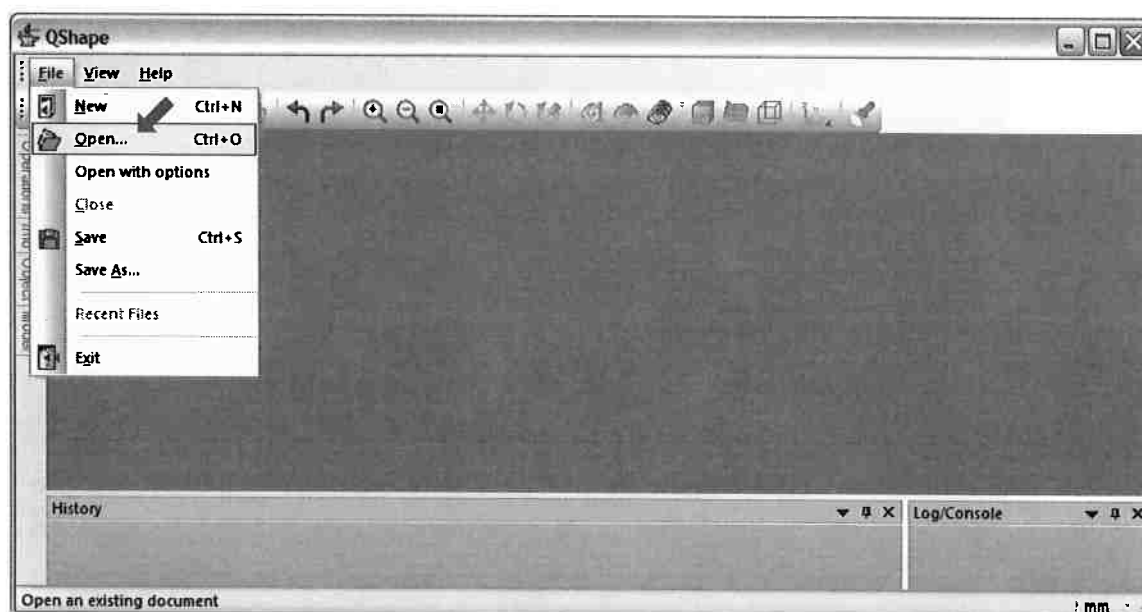
## ANEXO F – PROCEDIMENTO DE OBTENÇÃO DO ARQUIVO .SHL NO QSHAPE

Como parcela fundamental deste trabalho, constituindo um dos principais obstáculos ao andamento do mesmo, temos a etapa de assimilação dos sólidos (matriz, corpo de prova e punção), projetados em um programa de CAD, pelo programa de modelamento matemático QForm 3D. Logo, este anexo tem a função de criar um procedimento guiado passo a passo de maneira a instruir como tal passagem foi realizada.

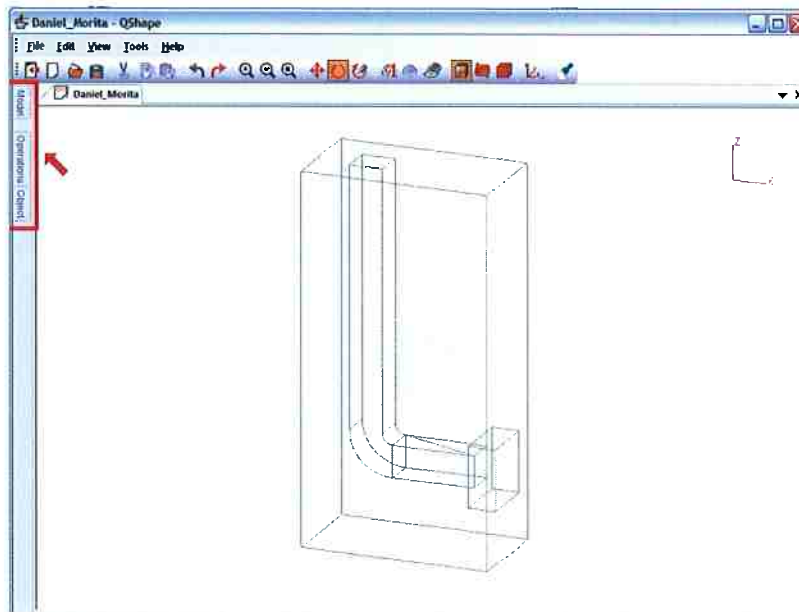
O primeiro passo é acessar o editor de geometria do QForm 3D, o qual é chamado de "QShape", clicando-se no botão assinalado abaixo na barra de ferramentas do QForm 3D.



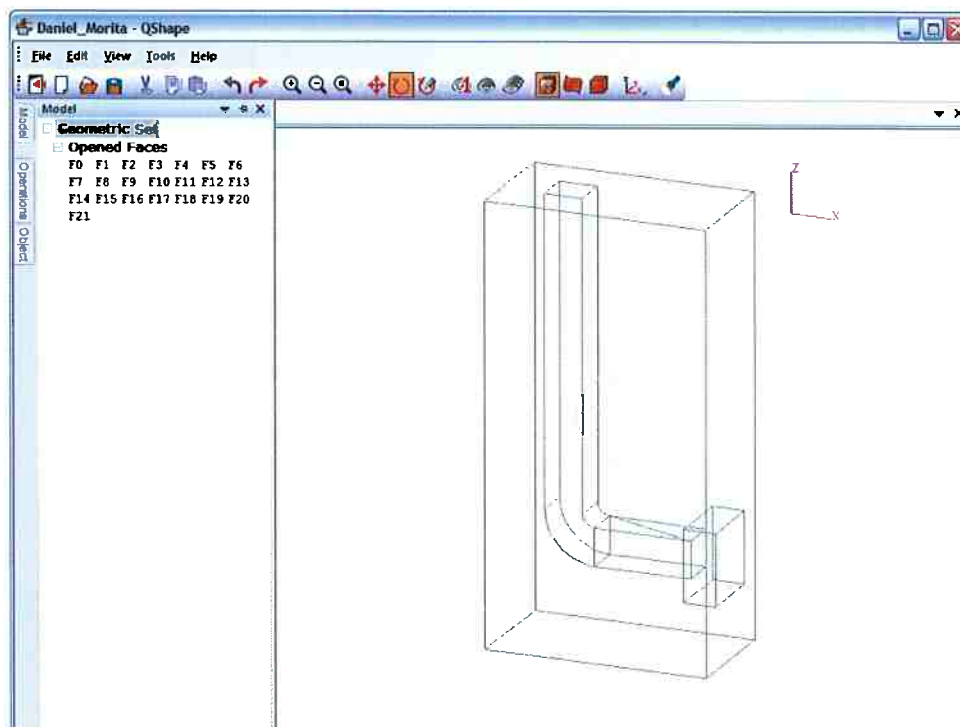
Feito isto, a janela do QForm 3D desaparecerá e a janela do QShape surgirá em seu lugar. Devemos clicar em "File" na barra de ferramentas conforme esquematizado na figura abaixo. Neste menu, clica-se em "Open" para abrir o browser que permite selecionar e abrir os arquivos de geometria feitos no programa de CAD.



Carregada a figura, ela surgira no QShape conforme exemplificado abaixo.

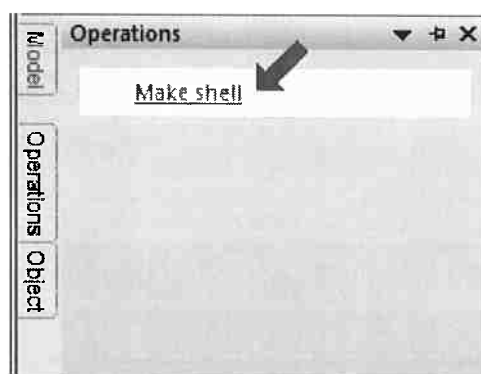


Ainda na figura acima, nota-se algumas abas localizadas na lateral esquerda da janela, na região assinalada em vermelho. Ao clicarmos na aba lateral intitulada por "Model", ela se expandirá revelando informações conforme a figura seguinte.

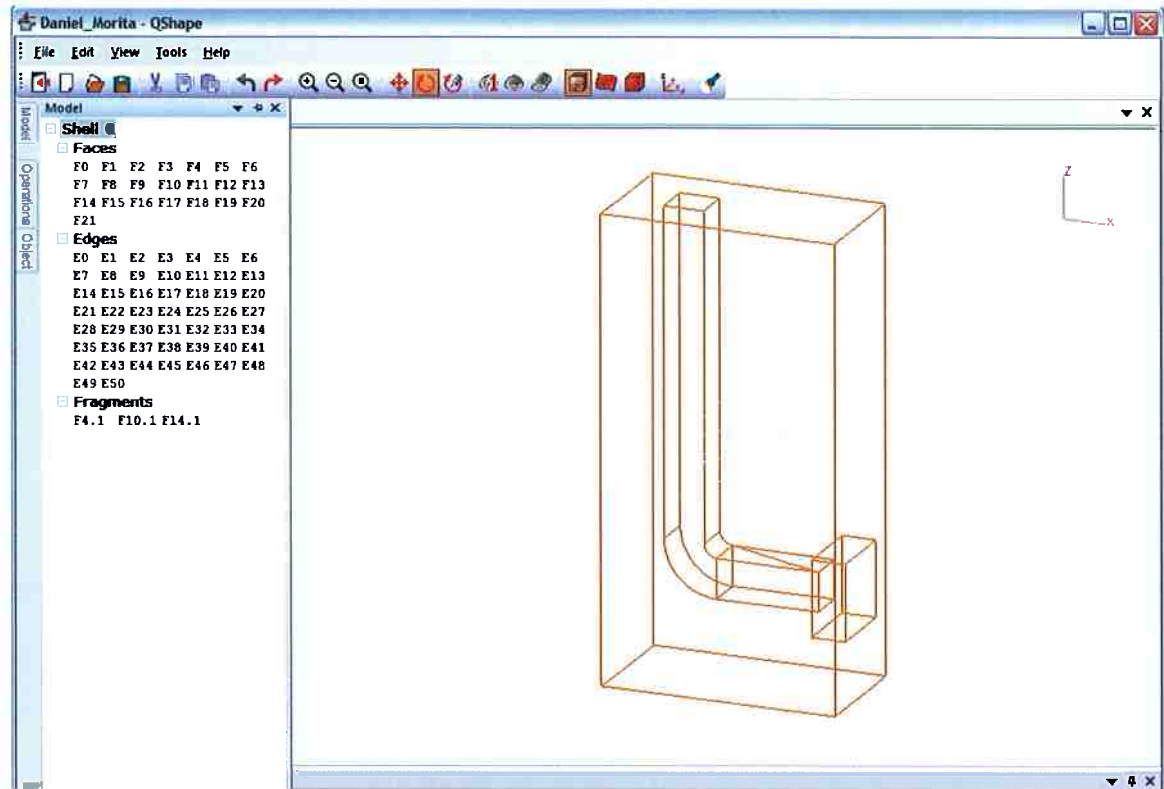


Com relação ao próximo passo, ainda na figura acima, devemos clicar sobre "Geometric Set" no campo expandido da aba "Model". Ao clicarmos sobre "Geometric Set", ele ficará grifado em cinza, conforme ele o está na figura acima. Ele estar realmente grifado em cinza é realmente um detalhe muito importante pois isto significa que o "Geometric Set" está selecionado.

Na sequência, devemos clicar sobre a aba lateral intitulada por "Operations". Caso o "Geometric Set" não esteja assinalado (grifado em cinza), o campo expandido desta aba não exibira opção alguma, logo, reforça-se que ele precisa estar assinalado. Quando o campo expandido da aba "Operations" surgir, será mostrada a opção "Make shell" conforme a figura a seguir.



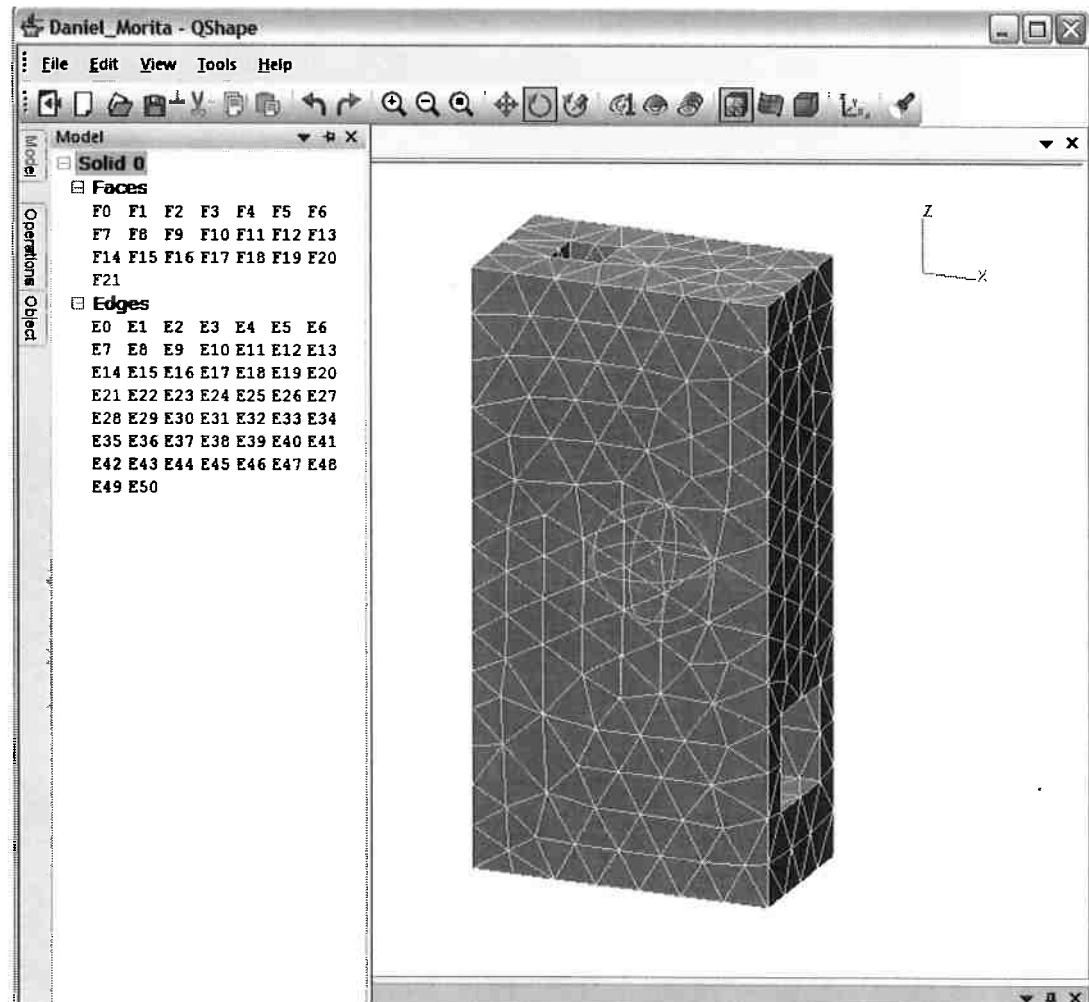
Ao clicar nesta opção, a estrutura do sólido antes exibida como linhas terá suas faces definidas conforme pode ser observado pela figura a seguir, onde as linhas se tornam laranjas.



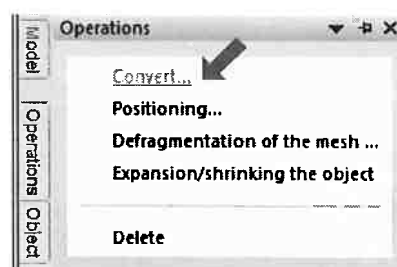
Feito isto, clicamos novamente na aba lateral intitulada por "Model", onde o seu campo expandido irá mostrar informações diferentes das que ele mostrava antes conforme pode ser observado na figura acima. Nesta etapa, precisamos selecionar (clique sobre de maneira a sublinhar em cinza) "Shell 0", para então clicar novamente sobre a aba "Operations" que fornecerá as opções mostradas abaixo:



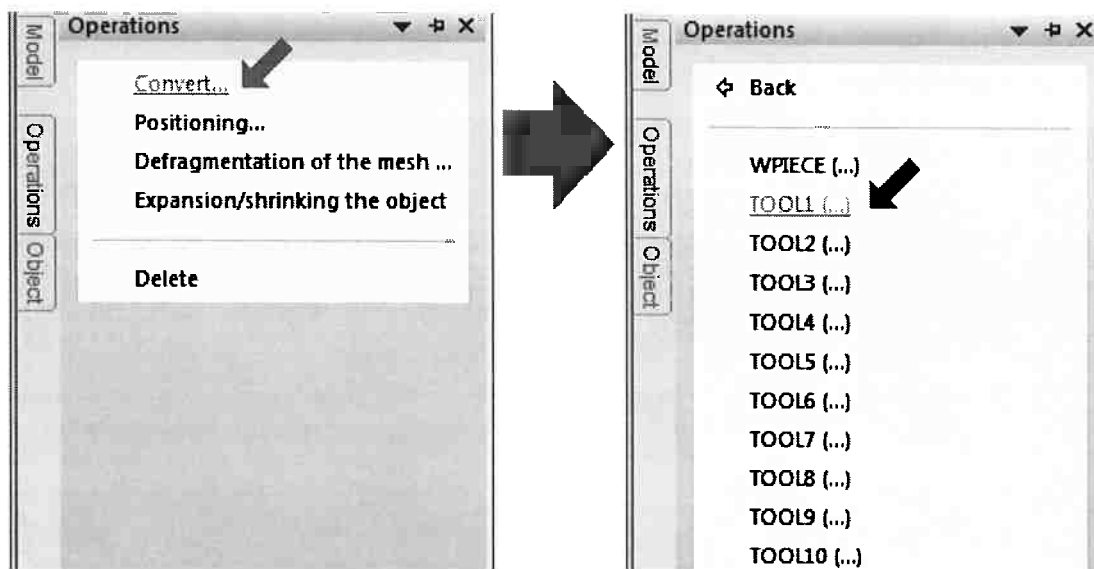
Clicando em "Mesh Generation", criamos as malhas sobre o sólido, resultando na figura a seguir:



De maneira análoga aos passos anteriores, clicamos na aba "Models", selecionando desta vez "Solid 0". Feito isto, clicamos sobre a aba "Operations" que fornecerá as seguintes opções:

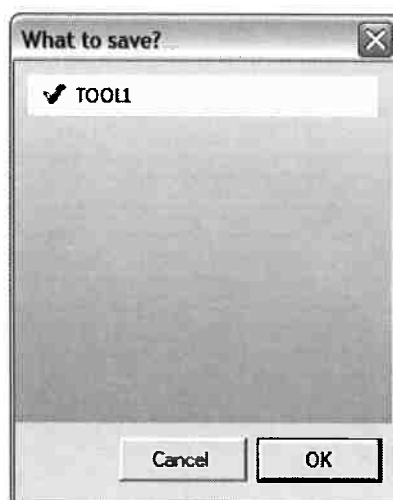


Ao escolhermos "Convert", o campo expandido de "Operations" fornecerá novas opções, onde devemos definir qual será a função que o sólido em questão vai desempenhar no processo:



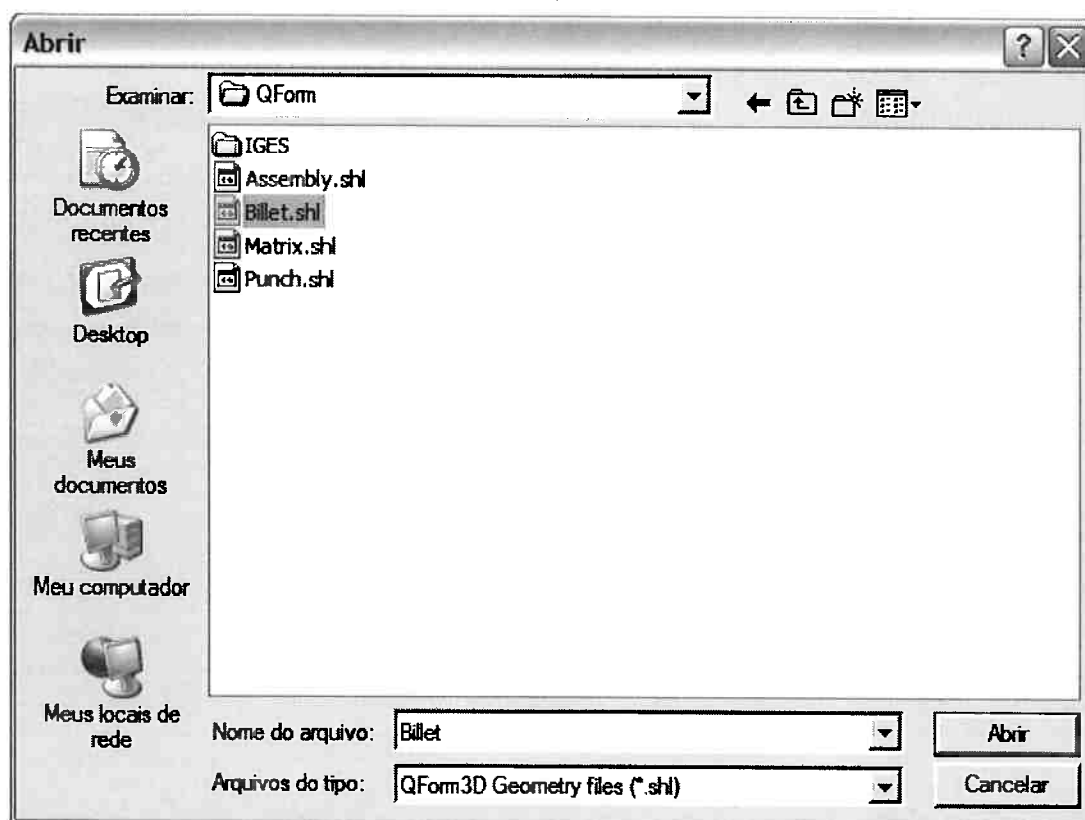
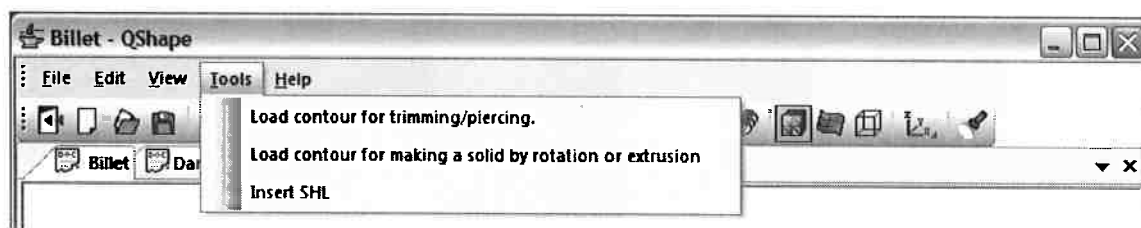
Corpo de Prova	("WPIECE")
Ferramenta 1	("TOOL1")
Ferramenta n	("TOOL n")

Para finalizar, clicamos sobre "File" na barra de ferramentas e em seguida em "Save SHL", surgindo a seguinte janela de confirmação:



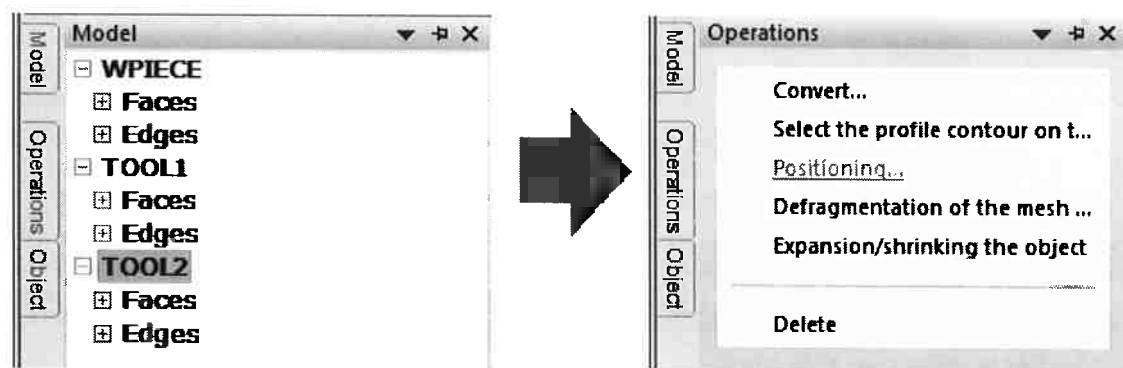
O próximo passo é executar todo o procedimento acima para os demais sólidos que estejam envolvidos no processo de conformação mecânica em questão.

Quando todos os arquivos .shl estiverem prontos, abrimos um deles, de preferência o com o maior sólido. Clicamos então , na barra de ferramentas, sobre "Tools" e então em "Insert SHL":

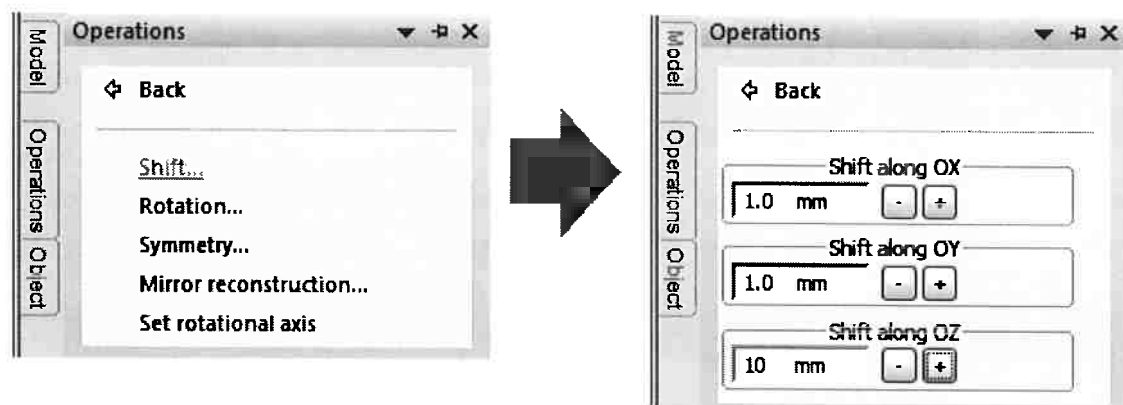


Selecionamos então um outro sólido, que não o aberto primeiramente. Repetimos, até carregar todos os arquivos .shl de todos os sólidos envolvidos no

processo. Feito isto, precisamos posicionar cada sólido de maneira a deixá-los na configuração de início de operação (simulação). Para tanto, selecionamos cada sólido (um por vez) no campo expandido da aba lateral "Model" e em seguida clicamos na aba "Operations" e então selecionamos "Positioning".

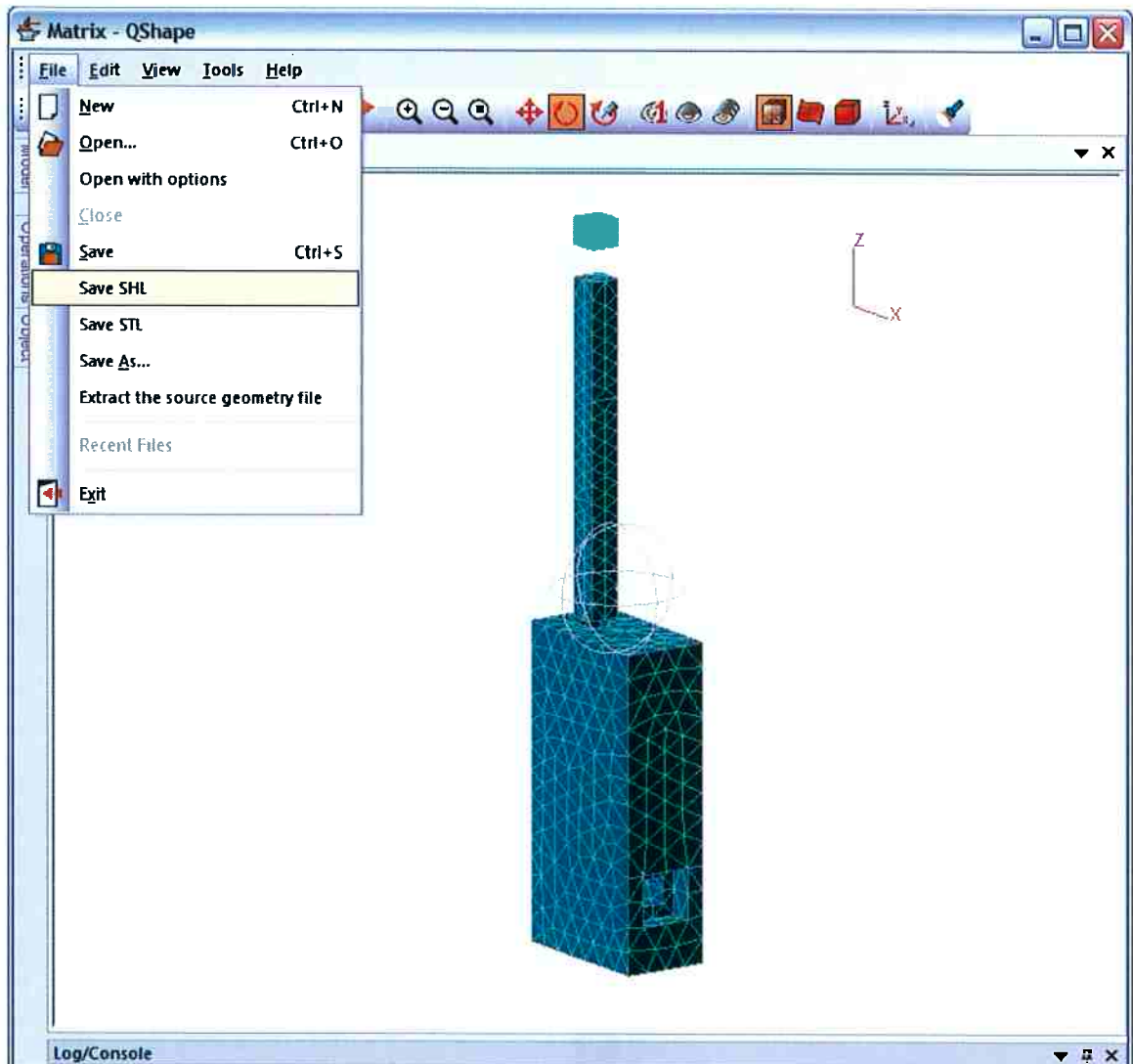


Serão oferecidas diversas opções de posicionamento porém, provavelmente a única que será necessária para posicionar todos os sólidos provavelmente será a de deslocamento ("Shift"), que ao ser selecionada resulta no menu à direita na figura abaixo:

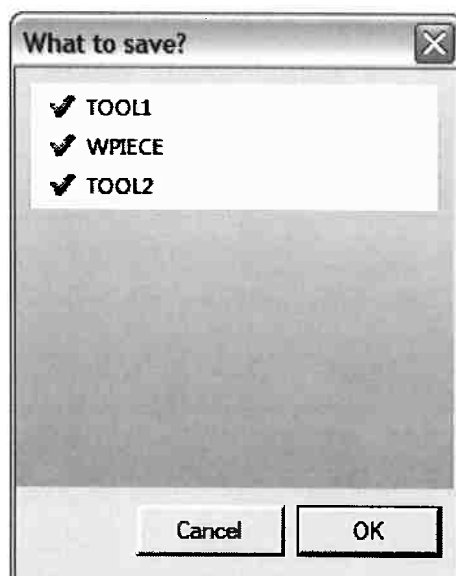


O valor em milímetros preenchido em cada campo serve para definir o quanto cada clique no botões - e + (localizados logo ao lado) vai resultar de deslocamento negativo (botão -) ou positivo (botão +) do sólido em relação ao respectivos eixos coordenados.

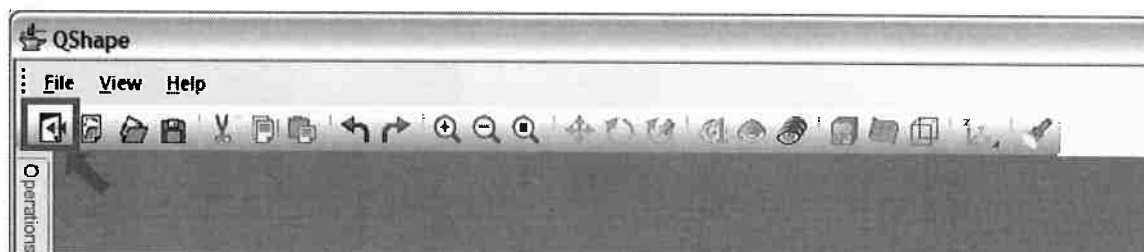
Acertadas as posições, clicamos em "File" e em seguida em "Save SHL", com a intenção de salvar o conjunto montado como um novo arquivo .shl, o qual intitularemos de "assembly" neste exemplo:



Surgirá então a seguinte mensagem de confirmação onde todos os sólidos envolvidos devem estar mencionados:



Clicamos no botão assinalado abaixo para retornar da janela do QShape para a janela do QForm 3D.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ruslan Z. Valiev , Terence G. Langdon - Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement. Progress in Material Science Vol. 5, pp. 881-981, 2006.
- [2] Yoshinori Iwahashi, Jingtao Wang, Zenji Horita, Minoru Nemoto and Terence G. Langdon - Principle of Equal-Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-Fine Grained Materials. Scripta Materialia, Vol. 35, No. 2, pp. 143-146,1996.
- [3] Terence G. Langdon , Cheng Xu - Influence of a Round Corner Die on Flow Homogeneity in ECA Pressing. Scripta Materialia Vol. 48, pp. 1–4, 2006.
- [4] M.H.Parsa, M.Naderi, M. Nili-Ahmadabadi, H. Asadpour - The Evolution of Strain during Equal Channel Angular Pressing.
- [5] Jun-Hyun Han, Jin-Yoo Suh, Kyu Hwan Oh and Jae-Chul Lee - Orientation Rotation Behavior in Aluminium Alloys during Dissimilar Channel Angular Pressing. Materials Transactions Vol. 45, No. 1, pp. 125-130, 2004.
- [6] Y. Wu and I. Baker - An Experimental Study of Equal Channel Angular Extrusion. Scripta Materialia. Vol. 37, No. 4, pp. 437-442, 1997.
- [7] M. R. Baldissera, J. P. Gouvêa, J. F. C. Lins - Análise por Elementos Finitos do Processo Ecap (Prensagem em Canais Equiangulares) Do Aço VMB 300. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.
- [8] SEGAL, V.M. - Engineering and commercialization of equal channel angular extrusion (ECAE). Materials Science and Engineering A, vol. 386, pp. 269-276, 2004.
- [9] J.K. Kim, W.J. Kim - Analysis of deformation behavior in 3D during equal channel angular extrusion. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 176 pp. 260–267, 2006.
- [10] J.R. Bowen , A. Gholinia , S.M. Roberts , P.B. Prangnell - Analysis of the Billet Deformation Behavior in Equal Channel Angular Extrusion. Materials Science and Engineering Vol. A287, pp. 87–99, 2000.

- [11] A.V. Nagasekhar, Yip Tick-Hon, H.P. Seow - Deformation Behavior and Strain Homogeneity in Equal Channel Angular Extrusion/Pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 192–193, pp. 449–452, 2007.
- [12] W.Q. Cao, A. Godfrey, Q. Liu - EBSP Investigation of Microstructure and Texture Evolution During Equal Channel Angular Pressing of Aluminium. *Materials Science and Engineering*, Vol. A361, pp. 9–14, 2003.
- [13] Saiyi Li - Effect of Strain Path Change on the Plastic Responses During Uniaxial Loading of Materials Pre-deformed by Equal Channel Angular Extrusion. *Scripta Materialia* Vol. 56, pp. 445–448, 2007.
- [14] M. Cabibbo, C. Scalabroni, E. Evangelista - Effects of Severe Plastic Deformation Induced by Equal-Channel Angular pressing in the AA1200, AA5754, AA6082 and AA6106 Modified with ZR and ZR+SC. *Metallurgical Science and Technology*, pp. 31-40.
- [15] C.J. Luis Pérez, P. González, Y. Garcés - Equal Channel Angular Extrusion in a Commercial Al–Mn Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 143–144, pp.506–511, 2003.
- [16] Hyung Seop Kim - Finite Element Analysis of Equal Channel Angular Pressing Using a Round Corner Die. *Materials Science and Engineering* Vol. A315, pp. 122–128, 2001.
- [17] A. Korchef, N. Njah, and A. W. Kolsi - Microstructure Investigation of Equal Channel Angular Pressed Aluminium by X-ray Diffraction and Scanning Electron Microscopy. *Cryst. Res. Technol.* Vol. 44, No. 1, pp. 106 – 110, 2009.
- [18] A. Vinogradov, M. Maruyama and S. Hashimoto - On the Role of Dislocation Hardening in the Monotonic and Cyclic Strength of Severely Plastically Deformed Metals. *Scripta Materialia* Vol. 61, pp. 817–820, 2009.
- [19] A.V. Nagasekhar, Yip Tick-Hon - Optimal Tool Angles for Equal Channel Angular Extrusion of Strain Hardening Materials by Finite Element Analysis. *Computational Materials Science*, Vol. 30, pp. 489–495, 2004.
- [20] Seung Chae Yoon, Min Hong Seo and Hyung Seop Kim - Preform Effect on the Plastic deformation Behavior of Workpieces in Equal Channel Angular Pressing. *Scripta Materialia* Vol. 55, pp. 159–162, 2006.

---

[21] V.M. Segal - Materials processing by simple shear, Mater. Sci. Eng., Vol. A197, pp. 157–164, 1995.

[22] V.M. Segal - Equal Channel Angular Extrusion: from Macromechanics to Structure Formation, Mater. Sci. Eng., Vol. A271, pp. 322–333, 1999.