

GIULIO ALBIERI ANTONIALLI

**MODELAGEM VIA ELEMENTOS FINITOS DA
ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE TITÂNIO PARA
APLICAÇÕES BIOMÉDICAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

GIULIO ALBIERI ANTONIALLI

**MODELAGEM VIA ELEMENTOS FINITOS DA
ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE TITÂNIO PARA
APLICAÇÕES BIOMÉDICAS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentada no programa de graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecatrônica**.

Área de Concentração: Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Wisley Falco Sales

UBERLÂNDIA

2018

GIULIO ALBIERI ANTONIALLI

**MODELAGEM VIA ELEMENTOS FINITOS DA
ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE TITÂNIO PARA
APLICAÇÕES BIOMÉDICAS**

Trabalho **APROVADO** pela
Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal
de Uberlândia.

Área de Concentração: Processos de
Fabricação

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wisley Falco Sales / (Orientador)

Prof MSc Leonardo Rosa Ribeiro Silva

Prof Dr Éder Silva Costa

Uberlândia, 05 de Setembro de 2018

Dedico essa Monografia

A meus pais e meu irmão que ofereceram todo o apoio possível em todos os momentos durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe Claudia Regina Albieri Antonialli, meu pai Adriano Pacheco Antonialli e ao meu irmão Luigi Albieri Antonialli por todo o apoio oferecido pelo meu ambiente familiar.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar esse curso.

Ao Professor Dr. Wisley Falco Sales pela possibilidade de realizar este projeto, além de toda a orientação e auxílio oferecidos no decorrer do trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso da Engenharia Mecatrônica.

A todos os amigos da Universidade Federal de Uberlândia.

MODELAGEM VIA ELEMENTOS FINITOS DA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE TITÂNIO PARA APLICAÇÕES BIOMÉDICAS

Monografia de Conclusão de Curso (Bacharel) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

Resumo

Este projeto visou estudar o processo de estampagem incremental, na conformação de peças em Titânio puro, para aplicações biomédicas, visando o entendimento do processo, usando ferramentas esféricas com a peça submersa em óleo lubrificante altamente aditivado para suportar condições de extrema pressão. O projeto foi dividido em três fases: testes experimentais de caracterização das propriedades mecânicas do material; seguido pela modelagem computacional via método de elementos finitos e, comparação das simulações com ensaios reais. Os resultados obtidos por meio da modelagem numérica permitiram, juntamente com os ensaios reais, entender melhor o comportamento do material ao sofrer conformação incremental a ponto simples, pois as diferenças entre os dois métodos foi aproximadamente 8%.

Palavras Chave: SPIF, Simulação, Elementos finitos, Conformação Mecânica.

ABSTRACT

This project aimed to study the process of incremental stamping, in the conformation of pure Titanium, for biomedical applications, aiming at the understanding of the process, using spherical tools with the submerged part in lubricated oil highly added to withstand extreme pressure conditions. The project is divided into three phases: experimental tests characterizing the mechanical properties of the material, followed by computational modeling using the finite element method and comparing the simulation with real tests. The results obtained through numerical modeling, and the physical tests, allowed a better understanding of the material behavior when undergoing incremental, because of the difference of 8% between the methods.

Key Words: SPIF, Simulation, Finite elements, Mechanical conformation

Lista de Figuras

Figura 1.1 -Braço robótico realizando conformação	2
Figura 2.1 - Esquema de uma barra sofrendo tração	4
Figura 2.2 - Corpo de prova para ensaio de tração	5
Figura 2.3-Diagramas de Tensão x Deformação	6
Figura 2.4-Pontos de interesse do diagrama	6
Figura 2.5-Exemplo de deformação lateral	7
Figura 2.6-Máquina CNC.	9
Figura 3.1 - Interface Abaqus(em preto onde escolher o tipo de peça e em vermelho onde se cria uma).....	13
Figura 3.2 - Dados da peça a ser criada	13
Figura 3.3 - Esboço peça inicial	14
Figura 3.4 - Esboço ponto de prova.....	15
Figura 3.5 - Esboço do estado final da peça	15
Figura 3.6 - definir densidade do material.....	16
Figura 3.7 - definir estado elástico do material	17
Figura 3.8 - definir estado plástico do material	17
Figura 3.9 - Definir calor específico do material.....	18
Figura 3.10 - peças juntas antes de posicionar	19
Figura 3.11 - posição final das peças.....	19
Figura 3.12 - Adicionar passo.....	20
Figura 3.13 - Modo da primeira condição de contorno	21
Figura 3.14 - Selecionar referência da condição de contorno	22
Figura 3.15 - Todas condições de contorno atribuídas na peça.....	23
Figura 3.16 - Tabela para adicionar coordenadas do caminho da ferramenta	24
Figura 3.17 - inserindo coordenadas a referencial.....	24
Figura 3.18 - Peça malhada com tamanho global 2.....	25
Figura 3.19 - Máquina MTS Landmark	26
Figura 3.20 - corpo de prova pronto para experimento	27
Figura 3.21 - Esboço com 1mm de espessura	28
Figura 3.22 - peça gerada no Fusion 360.....	28
Figura 3.23 - Janela de adicionar caminho da ferramenta	29
Figura 3.24 - Percurso gerado pelo programa	29
Figura 4.1 - Gráfico Tensão x Deformação Ti	32
Figura 4.2 - Gráfico Tensão x Deformação Ti corrigido.....	33
Figura 4.3 - Resultado Simulação	34
Figura 4.4 - vista lateral da simulação	35
Figura 4.5 - a) Corpo de prova do ensaio nº 3. b) Detalhe do rompimento tipo fratura.....	35

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Exemplo Código G.....	11
Tabela 2 - Parâmetros usados nos experimentos realizados por Tenani (2018).....	30

Lista de Símbolos

V	Volume da peça
V_i	Volume do elemento da malha
σ_x	Tensão no eixo X
A	Área
N	Força Normal
σ	Tensão Normal
ε	Deformação
Δl	Variação da Largura
l	Largura
ν	Coefficiente de Poisson
ε_t	Deformação transversal
ε_l	Deformação longitudinal
Δd	Variação do diâmetro
d	diâmetro
mm	milímetro
E	Módulo de Elasticidade
r	Coefficiente de anisotropia
Δr	Coefficiente de anisotropia planar
ε_w	deformação verdadeira na largura
ε_t	deformação verdadeira na espessura

LISTA DE ABREVIATURAS

SPIF	Single Point Incremental Forming
MEF	Método dos Elementos Finitos
C.G.	Centro Gravitacional
CN	Comando Numérico
CNC	Comando Numérico Computacional
CAM	Maquina Assistida por Computadores

Sumário

Sumário

INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa	2
1.2. Objetivos.....	2
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1. Modelagem em Elementos Finitos	3
2.2. Ensaio de tração e compressão	4
2.3. Anisotropia	8
2.4. Programação de Máquina CNC.....	8
METODOLOGIA.....	12
3.1. Simulação da Conformação	12
3.1.1. Programa Utilizado.....	12
3.1.2. Gerar plano inicial	12
3.1.3. Gerar ponta de prova	14
3.1.4. Gerar o suporte do experimento	15
3.1.5. Definir propriedades do material.....	16
3.1.6. Definir posição das peças	18
3.1.7. Adicionar passos da simulação.....	20
3.1.8. Adicionar interação.....	20
3.1.9. Adicionar condição de contorno.....	21
3.1.10. Inserir caminho da ferramenta.....	23
3.1.11. Malhar o modelo.....	25
3.1.12. Gerar a simulação	25
3.2. Ensaio de Tração	26
3.3. Definir Caminho da ferramenta.....	27
3.4. Parâmetros da Estampagem Incremental Utilizados na simulação real.....	30
RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1. Resultados do ensaio de Tração	31
4.2. Resultados da simulação de conformação a ponto do Ti	34
4.3. Comparando resultados da simulação com os reais obtidos em outro trabalho ..	35
CONCLUSÕES.....	37
Referências Bibliográficas	38

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A necessidade de um método de fabricação de prototipagem rápida sempre foi presente e está cada vez mais requisitada pelo fato do crescimento da necessidade de peças únicas para áreas como: saúde (médica, odontológica), aeroespacial, petroquímica, entre outras. Existe um foco maior para áreas médicas pelo fato de não existir dois organismos iguais, portanto cada peça a ser produzida nesta área precisa ser na medida do usuário.

O problema é que os sistemas de prototipagem rápida presente no mercado são extremamente caros pelo alto custo energético e equipamentos de alta tecnologia para essa produção de peças em pequena escala e únicas.

O processo de conformar uma peça em partes foi idealizada por Roux e Leszak (1960) e o processo de conformação incremental a ponto simples (SPIF – *Single Point Incremental Forming*) usando uma máquina de CNC, como ferramenta de estampagem. É uma tecnologia nova onde se estuda uma conformação realizada por um único ponto, que gradualmente conforma a peça no formato desejado, assim sendo possível realizar peças com mais detalhes em um processo mais rápido e barato.

Esse processo pode ser realizado a baixo custo pelo fato de que hoje em dia, quase todas as empresas de fabricação possuem uma máquina de CNC onde basta colocar a ferramenta de conformação e programar a máquina. Além de existirem métodos onde a ferramenta é inserida em um braço robótico para poder fazer produção em massa (Fig.1.1).

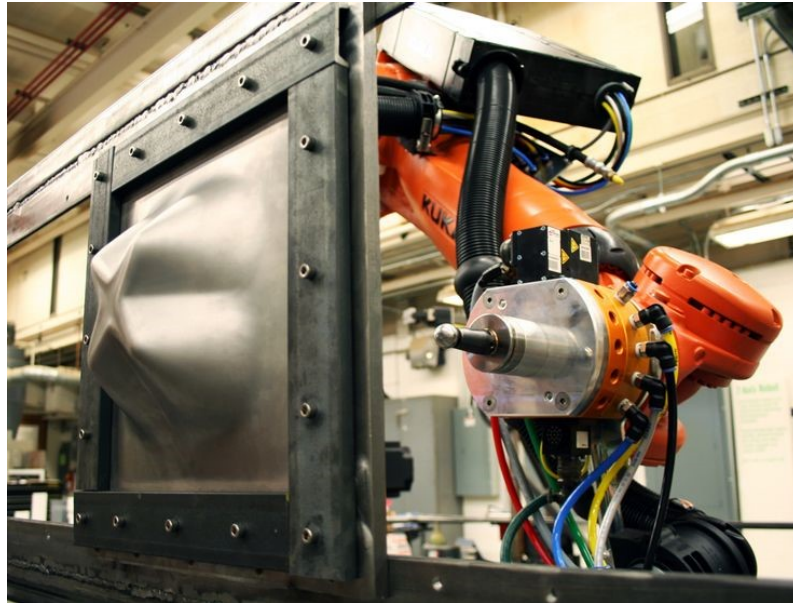


Figura 1.1 -Braço robótico realizando conformação

Como a área que mais demanda produção de peças únicas é a área médica, o estudo realizado será em cima do Titânio, por ele não ser considerado um corpo estranho ao organismo, portanto sendo o material recomendado.

1.1. Justificativa

Percebe-se que o problema do titânio é que ele não é um material fácil de trabalhar especialmente na parte de conformação, pois não é um material muito elástico como o alumínio. Assim, é necessário fazer algumas simulações para poder ver o ponto limite de conformação do titânio. Especialmente pelo fato de ser um material mais caro, podendo ter uma melhor noção dos parâmetros a serem utilizadas na hora da conformação. Tendo assim um processo otimizado e com menor risco de perder a peça fabricada.

1.2. Objetivos

O objetivo geral desse projeto visa utilizar técnicas de simulação em elementos finitos para comparar com resultado real.

Os objetivos específicos são:

- Modelagem da estampagem incremental via método de elementos finitos;
- Comparar resultados simulados com resultados reais gerados por Tenani (2018).

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo trata de assuntos importantes para a compreensão do trabalho, tais como: modelagem em elementos finitos, ensaios de tração e compressão de materiais, configuração de máquinas CNC.

2.1. Modelagem em Elementos Finitos

A MEF é uma técnica amplamente utilizada na indústria para simulação computacional de todos os tipos na engenharia. Ela é muito utilizada para tornar formas de objetos em discretizações geométricas para computadores processarem a informação da simulação.

Isso ocorre pelo fato de a MEF discretizar essas formas em um número finito de elementos geométricos sendo esses, triângulos ou quadriláteros. Com isso os processadores computacionais não precisam calcular todas as reações na peça, apenas nos elementos gerados.

Para que possa ser usado o MEF, precisa ter uma equação integral que exista onde seja possível substituir a integral de um domínio complexo. Assumindo como V , pela somatória das integrais referente a geometrias simples e assumindo como V_i , sendo V_i os elementos discretizados. Entende-se que a MEF corresponde a seguinte integral de volume da função f :

$$\int_V f \, dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f \, dV \quad (2.1)$$

Com isso pode assumir que:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (2.2)$$

Sendo possível resolver todas as integrais no domínio V_i , resta apenas realizar a somatória da equação 2.1, podendo obter a integral de todo o domínio. Os subdomínios V_i representam os elementos de geometrias simples comentados acima.

Com essa somatória realizada em 2.1, aparece uma forma parecida com a desejada, porém sendo formada por elementos finitos.

Ao entender o básico do MEF, uma simulação melhor será realizada ao fazer a divisão de subdomínios mais eficientes para um resultado mais próximo do esperado.

2.2. Ensaio de tração e compressão

Ensaio de tração e compressão são realizados para achar os coeficientes do material a ser usado. Para isso uma breve revisão de tração e compressão é necessária. Abaixo tem-se uma barra onde aplica uma força bidirecional, ou seja, uma força tração. Ao realizar um corte esquemático da peça pode ser visto as forças de reação do material.

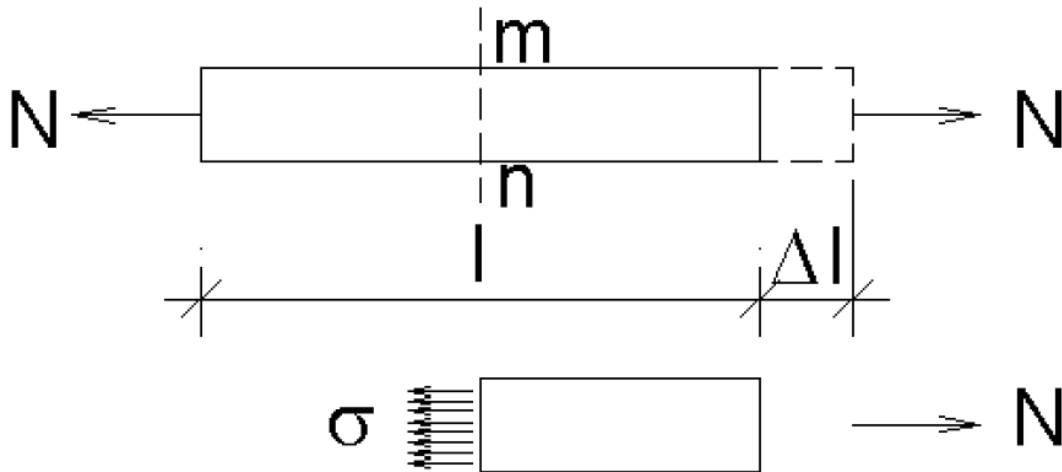


Figura 2.1 - Esquema de uma barra sofrendo tração

Assim sabe que força é igual a tensão vezes área:

$$\sigma_x A = N \quad (2.3)$$

Ao considerar N aplicado no C.G. é possível achar:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2.4)$$

Onde σ é tensão normal, isso considerando que a tensão é distribuída uniformemente na barra.

Para saber se a barra está sofrendo compressão basta aplicar a força N no sentido oposto da figura 2.1 sendo assim σ e N teriam valor negativos.

Portanto pode afirmar: $N > 0 \rightarrow \sigma > 0$ $\therefore$ é tração

$N < 0 \rightarrow \sigma < 0$ $\therefore$ é compressão

Para descobrir a deformação que a barra sofre basta usar a equação abaixo:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.5)$$

Onde Δl é o alongamento total da barra e l o comprimento total, sendo assim a deformação é adimensional por dividir duas unidades de distância.

Tendo revisado a parte básica de compressão e tração deve-se entender o que os ensaios de tração fornecem, os diagramas de tensão-deformação. Esses gráficos são adquiridos experimentalmente por ensaios destrutivos de uma espécie do material a ser avaliado. As espécies que são realizadas o ensaio geralmente possuem o formato da figura 2.2.

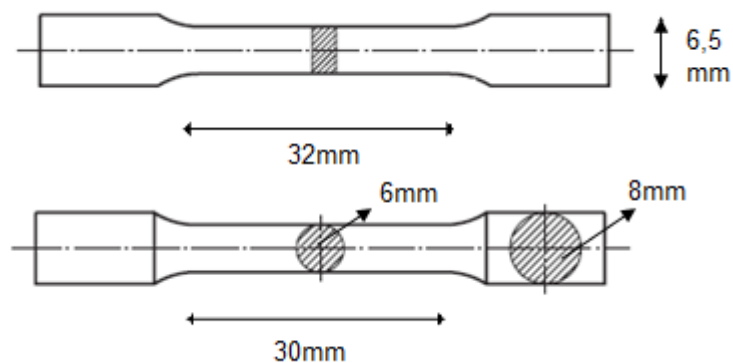


Figura 2.2 - Corpo de prova para ensaio de tração

Esses diagramas são gerados ao submeter uma peça a tração até que ela rompa e enquanto o ensaio é realizado mede-se a deformação e tensão aplicada e com isso se gera o diagrama. Abaixo é possível ver alguns exemplos de diagramas gerados a partir de ensaios.

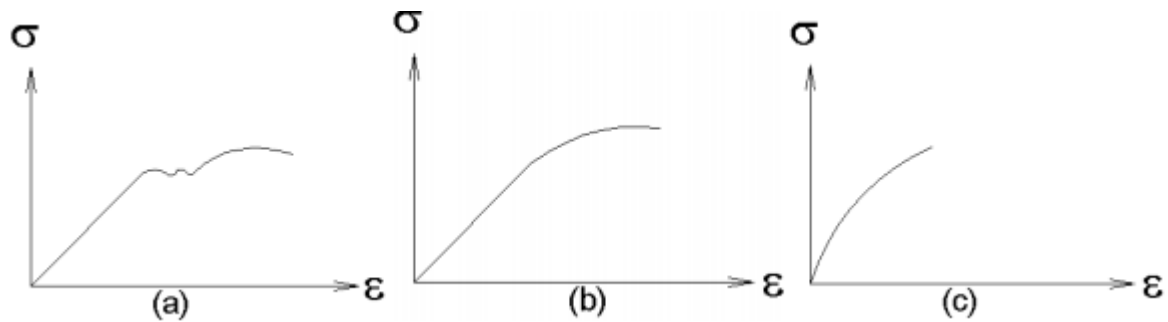


Figura 2.3-Diagramas de Tensão x Deformação

Pelos diagramas acima pode-se ver diferentes comportamentos de matérias, para o tipo de experimento realizado precisa evitar diagramas como da figura 2.3 (c) pois são tipo de matérias frágeis. Estes tipos de matérias não resistem muita deformação e um regime plástico muito perto do ponto de rompimento da peça, sendo assim muito difícil fazer compressão sem romper ou danificar.

O tipo de material ideal para se trabalhar em conformação é do diagrama da Figura 2.3 (b) por ser um material dúctil, pois possuem um regime elástico maior. Mesmo o diagrama da Figura 2.3 (c) também possuir um regime elástico bom, para atingi-lo precisa gastar uma quantidade maior de energia.

Já que precisa atingir o estado de regime plástico para realizar a conformação do material pode ignorar os primeiros pontos do diagrama e considerar apenas os pontos do regime plástico. Estes pontos serão cruciais para calcular coeficientes para simulação e entender melhor como o Titânio irá reagir com a conformação. Estes pontos estão representados na Figura 2.4.

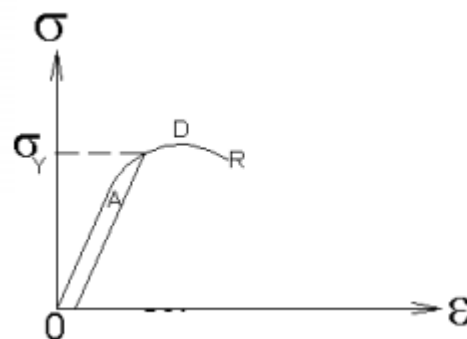


Figura 2.4-Pontos de interesse do diagrama

Como o regime elástico será ignorado, será focado o entendimento do diagrama após o ponto A. Após o ponto A o material entra no regime plástico, quando o material entra nesse

ponto ao sofrer deformação ele não consegue mais retornar ao estado anterior assim ao parar de realizar a tração ou compressão ele continuará deformado.

Ao passar desse ponto o material começa a resistir ao aumento de carga aplicada gerando uma curva não linear. Quando chega no ponto D ele atingiu a tensão máxima, também conhecida como limite de resistência. Passando esse ponto o material irá rapidamente caminhar para o ponto R onde ocorrerá a ruptura.

Para poder fazer um bom ensaio de conformação deve-se trabalhar perto do ponto D, mas sem atingi-lo, pois, provavelmente chegará ao ponto de ruptura e perderá a peça. Por isso, a importância de fazer vários ensaios do material para que se possa achar um valor do limite de resistência confiável.

Outro dado importante para ser obtido destes experimentos é o Coeficiente de Poisson. Este coeficiente relaciona a deformação que a peça sofre na dimensão perpendicular a força aplicada, pois uma peça ao sofrer alongamento acontece um decréscimo da dimensão transversal, ou um acréscimo caso for compressão. Vendo na Figura 2.5 pode observar o efeito.



Figura 2.5-Exemplo de deformação lateral

O coeficiente de Poisson é a relação da deformação transversal sobre a deformação longitudinal dentro da região plástica, sendo este:

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad (2.6)$$

Onde:

$$\varepsilon_t = \frac{\Delta d}{d} \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.8)$$

Portanto para achar este coeficiente basta medir a deformação que a peça sofreu longitudinalmente e transversalmente.

2.3. Anisotropia

Quando um material sofre processo de conformação os grãos cristalinos individuais são alongados na direção de maior tração, isso ocorre pelo fato do escorregamento do material durante a deformação. Por causa do confinamento mútuo entre grãos os grãos de materiais policristalinos tendem a girar para alguma orientação limite. Isto faz com que os planos atômicos e direções cristalinas dos materiais com orientação aleatória adquiram texturas tornando o material anisotrópico.

Isso significa que de acordo com a direção que o material sofre a conformação a reação do material será diferente. E com o coeficiente de anisotropia pode ter a noção dessa diferença de comportamento que a chapa pode apresentar em seu plano.

O coeficiente é a razão de deformação verdadeira na largura e na espessura de um corpo de prova de tração.

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.9)$$

Onde:

r – coeficiente de anisotropia;

ε_w - deformação verdadeira na largura;

ε_t - deformação verdadeira na espessura.

Como a conformação é feito em uma chapa, deve se calcular o Coeficiente de anisotropia planar. Para isso precisa de o coeficiente anisotrópico de 3 ensaios um onde corpo de prova foi cortado da chapa com ângulo de 0 graus, outro a 45 graus e um de 90 graus. Assim:

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} + 2*r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (2.10)$$

2.4. Programação de Máquina CNC

O Comando Numérico (CN) foi desenvolvido em 1952 para facilitar e aumentar a produção de peças fabricadas por maquinários. Ele consiste em informações de sequências de

trajetória da ferramenta para fabricar uma peça de geometria específica. A inserção destes dados consistia em cartões perfurados.

Com o desenvolvimento de processamento computacional surgiu o Comando Numérico Computacional (CNC) que consiste em comandos escritos de forma que a máquina de fabricação entenda, porém, as informações são inseridas via computador. Essas informações podem ser geradas por programas computacional que usam CAM (*Computer Aided Manufacturing*), utilizando o código gerado basta imputa-lo no CNC que irá fabricar as peças.



Figura 2.6-Máquina CNC.

Mas para poder configurar essas máquinas precisa-se compreender os códigos do comando numérico. Neste caso por ser uma trajetória simples e não possui geometria complexa, o foco será apenas na programação manual de CNC.

A programação manual é um programa elaborado na linguagem em que o CNC consiga compilar. Esta linguagem consiste em conjuntos de códigos formados por letras e números. Alguns parâmetros devem ser definidos no programa como velocidade, posição, escala de medição entre outros. A posição pode ser informada em coordenadas absoluta ou incremental.

Existem diversos comandos como posicionamento, ligar/desligar rotação, ativar fluido de corte ou desativar, liberar a escotilha para poder abrir, e alguns ciclos pré-programados como furação, rosqueamento e chanfro.

Esses códigos usados na programação manual incluem o código G que são comandos definidos para montar o programa CNC alguns exemplos na Tab.1:

Código G	Função
G00	Posicionamento rápido
G01	Interpolação linear
G02	Interpolação circular no sentido horário (CW)
G03	Interpolação circular no sentido anti-horário (CCW)
G04	Temporização (Dwell)
G05	Não registrado
G06	Interpolação parabólica
G07	Não registrado
G08	Aceleração
G09	Desaceleração
G10 a G16	Não registrado
G17	Seleção do plano XY
G18	Seleção do plano ZX
G19	Seleção do plano YZ
G20	Programação em sistema Inglês (Polegadas)
G21	Programação em sistema Internacional (Métrico)
G22 a G24	Não registrado
G25 a G27	Permanentemente não registrado
G28	Retorna a posição do Zero máquina
G29 a G32	Não registrados
G33	Corte em linha, com avanço constante
G34	Corte em linha, com avanço acelerando
G35	Corte em linha, com avanço desacelerando
G36 a G39	Permanentemente não registrado
G40	Cancelamento da compensação do diâmetro da ferramenta
G41	Compensação do diâmetro da ferramenta (Esquerda)
G42	Compensação do diâmetro da ferramenta (Direita)
G43	Compensação do comprimento da ferramenta (Positivo)
G44	Compensação do comprimento da ferramenta (Negativo)
G45 a G52	Compensações de comprimentos das ferramentas
G53	Cancelamento das configurações de posicionamento fora do zero fixo
G54	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (01)
G55	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (02)
G56	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (03)
G57	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (04)
G58	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (05)
G59	Zeragem dos eixos fora do zero fixo (06)

G60	Posicionamento exato (Fino)
G61	Posicionamento exato (Médio)
G62	Posicionamento (Grosceiro)
G63	Habilitar óleo refrigerante por dentro da ferramenta
G64 a G67	Não registrados
G68	Compensação da ferramenta por dentro do raio de canto
G69	Compensação da ferramenta por fora do raio de canto
G70	Programa em Polegadas
G71	Programa em metros
G72 a G79	Não registrados
G80	Cancelamento dos ciclos fixos
G81 a G89	Ciclos fixos
G90	Posicionamento absoluto
G91	Posicionamento incremental
G92	Zeragem de eixos (mandatório sobre os G54...)
G93	Avanço dado em tempo inverso (Inverse Time)
G94	Avanço dado em minutos
G95	Avanço por revolução
G96	Avanço constante sobre superfícies
G97	Rotação do fuso dado em RPM
G98 e G99	Não registrados

Tabela 1 - Exemplo Código G

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentado todo o desenvolvimento do projeto, que foi dividido três partes. A primeira foi a demonstração passo a passo de como construir uma simulação de compressão a ponto para futuro uso. A segunda parte reside no ensaio de tração realizado no Ti para poder ter os dados necessários para uma simulação mais próxima da real. A última parte consiste em como conseguir o caminho da ferramenta via software para ser usado na simulação.

3.1. Simulação da Conformação

3.1.1. Programa Utilizado

A simulação para ser realizada foi usado o software Abaqus, que é um pacote de *software* comercial para análise por elementos finitos desenvolvido pela HKS Inc de Rhode Island, Estados Unidos e agora comercializado sob a SIMULIA marca da Dassault Systemes S.A.

O conjunto de produtos Abaqus consiste em três produtos principais: Abaqus / Standard, Abaqus / Explicit e Abaqus / CAE.

Sendo usado o Abaqus/CAE para realizar a simulação. A escolha deste software foi pelo fato de ser bastante utilizado tendo bibliotecas grandes para estudos e por possuir uma versão gratuita do software para estudante.

3.1.2. Gerar plano inicial

Primeiro passo é gerar o estado inicial da peça que vai sofrer o experimento. Para isso precisa seleccionar o modo *Part* no *Module* do Abaqus e criar uma parte que será chamada de estado1.

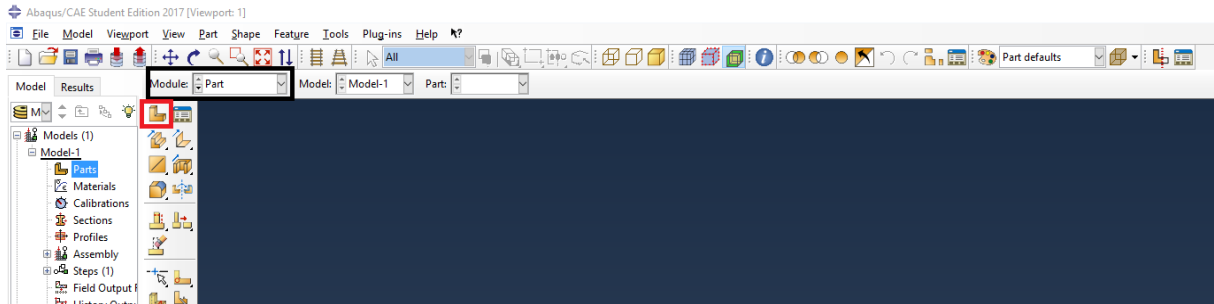


Figura 3.1 - Interface Abaqus(em preto onde escolher o tipo de peça e em vermelho onde se cria uma)

Para criar uma peça basta clicar no ícone em vermelho representado na Figura 3.1. Onde deve-se criar uma peça em formato 3D tipo deformável (*Deformable*), cavada (*Shell*) e plana (*Planar*), mostrada na Figura 3.2.

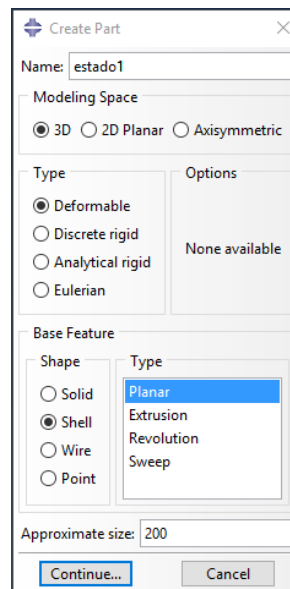


Figura 3.2 - Dados da peça a ser criada

Quando terminar de definir os dados da peça é necessário esboçar a forma inicial da peça, neste caso e em quase todos os casos, a peça inicial deve ser um quadrado. Neste caso será um de 200x200mm. Para facilitar o posicionamento do suporte e da ponta de prova é aconselhável deixar o ponto central da peça no mesmo ponto da intersecção dos planos do programa.

A criação do esboço é feita que nem um programa comum de CAD. Neste exemplo foram feitas duas linhas centrais e usando a função *Add Constraint* (adicionar condição) para fixar estas linhas (H e V na Figura 3.3) para usar de referência para centralizar a peça. Após criar um retângulo foi usado o modo *Add Dimensions* (adicionar dimensões).

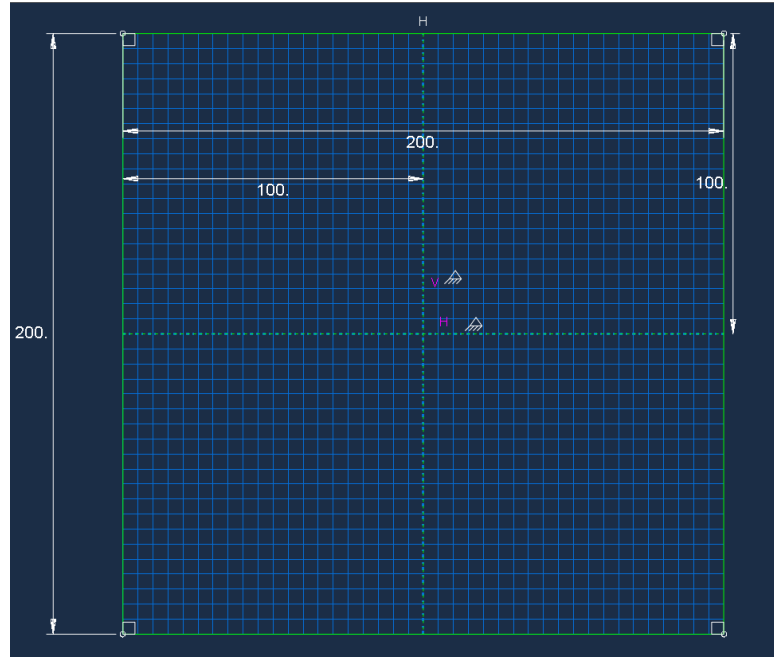


Figura 3.3 - Esboço peça inicial

Ao final deste passo basta clicar em *done* e sua peça será gerada e adicionada na aba do Abaqus no canto esquerdo superior dentro de *Parts(1)*. Caso seja necessário qualquer alteração da peça basta clicar nela com botão direito e selecionar *Edit* (Editar).

Antes de ir para próxima etapa precisa definir a coordenada central desta peça, para isto, basta usar a função *Create Datum CSYS:3Points* e definir as coordenadas x,y como 0,0,0.

3.1.3. Gerar ponta de prova

Os primeiros passos são os mesmos citados no item anterior, porém deve-se nomear a peça de Ponta de prova e definir os dados como *Analytical rigid* (analítico rígido) e o *Base Feature* (característica base) como *Revolved Shell* (revolução de casca).

Agora, novamente deve-se fazer o esboço da peça, precisa definir duas linhas fixas como referência uma para tangenciar a ponta da ferramenta e outra para definir a posição da base. Como a peça será produzida em revolução, será necessário apenas uma linha, após isso.

Gerando as duas linhas H e V novamente e fixando elas. Um quarto de círculo e um pedaço de linha reta será feito para definir a linha de revolução da ferramenta. Após isto basta tangenciar o quarto de volta na linha H e a distância da linha reta igual ao raio da peça, usando novamente a função *Add Constraint* (adicionar condição).

No caso do experimento o diâmetro da ferramenta terá 10,5mm. Assim foi obtido o esboço da peça na figura (3.4).

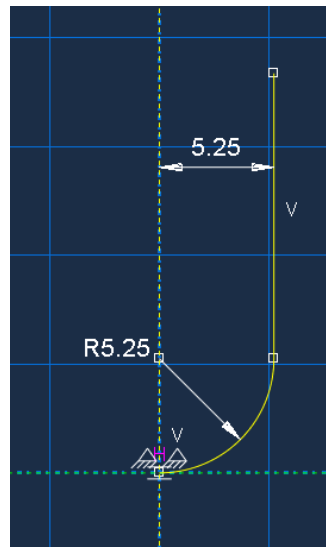


Figura 3.4 - Esboço ponto de prova

Após clicar em *done* a peça será gerada e agora deve-se inserir um ponto de referência da peça para facilitar posicionamentos. Para isso basta clicar em *Tools* na barra superior e escolher *Reference Points* assim deve se escolher o ponto 0,0,0 novamente.

3.1.4. Gerar o suporte do experimento

Para gerar a última peça necessária para simulação basta criar com os mesmos dados que da ponta de prova, porém nomeá-la de suporte. Neste caso, será gerado em revolução pois, é uma base simples que suportará a peça enquanto sofre a compressão.

Para realizar o esboço desta peça será feito apenas um L com distância de 104mm do centro de rotação como mostrado na Figura 3.5

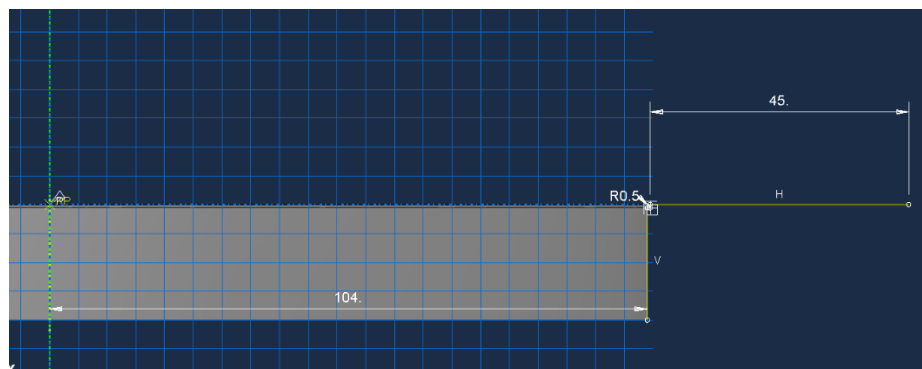


Figura 3.5 - Esboço do estado final da peça

Após terminar a peça é necessário criar um ponto central de referência da peça. Agora deve criar um ponto de referência em 0,0,0. Para fazer isso basta clicar em *Tools* na barra superior e selecionando *Reference Point* e colocar as coordenadas.

3.1.5. Definir propriedades do material

Após as peças serem completas precisa-se começar a criar propriedades para estas. Para isso vai-se em *Module* e seleciona a opção *Property* e dentro das novas opções que apareceram na barra de ferramentas escolha a primeira da direita que é *Material Manager*.

Quando abrir a janela do *Material Manager* clica-se na opção *create*, aqui vai se criar todas as definições físicas do material que será usado. Como o Titânio que será usado o nome dado será de titânio.

Próximo passo será definir todas as propriedades do material, para poder realizar a simulação, primeiro será mostrado como definir a densidade. Clicando em *General* irá aparecer a opção *Density* que ao clicar nela irá adicionar densidade ao material, basta inserir o valor desejado.

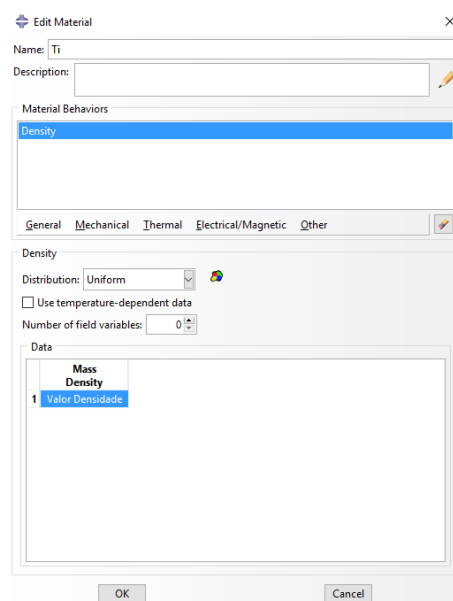


Figura 3.6 - definir densidade do material

Agora deve-se definir a elasticidade do material, para adicionar esta propriedade basta ir na opção *Mechanical* ao lado de *General* e selecionar a opção *Elasticity* → *Elastic* e assim como a densidade irá aparecer para inserir o valor de Poisson e A resistência elástica do material.

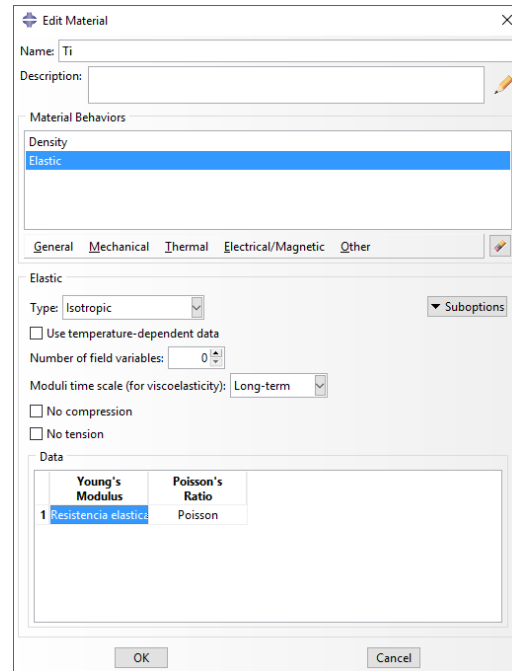


Figura 3.7 - definir estado elástico do material

A próxima propriedade será de plasticidade, indo novamente em *Mechanical*, selecionasse *Plasticity* → *Plastic*. Nesta parte os dados solicitados são a limite de tensão do material e o modulo de resistência plástica deste.

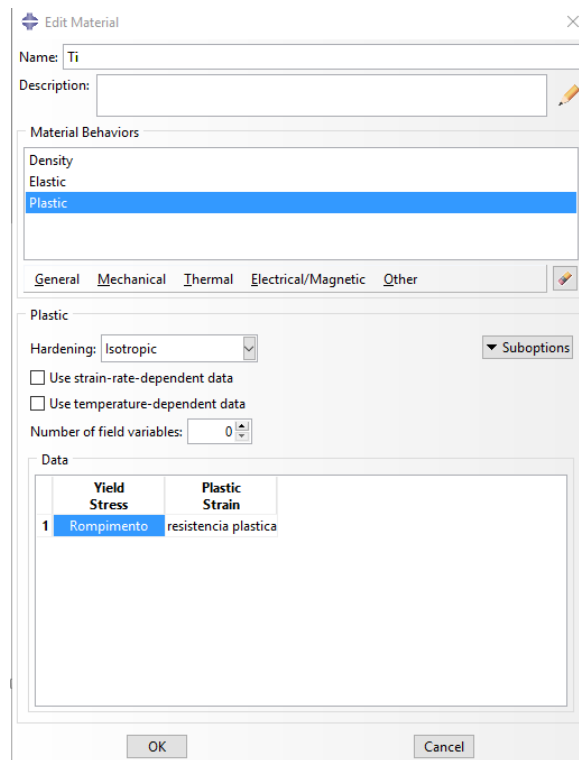


Figura 3.8 - definir estado plástico do material

A última propriedade será o calor específico do material. Basta clicar em *Thermal* e selecionar a opção *Specific heat* e inserir o valor do calor específico do material.

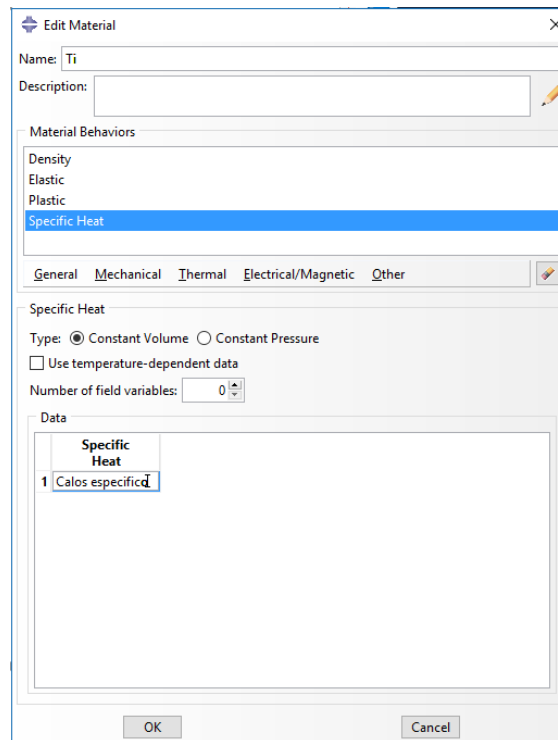


Figura 3.9 - Definir calor específico do material

3.1.6. Definir posição das peças

Agora que todas as peças necessárias foram criadas precisa-se juntá-las para simulação. Para isso deve-se criar um *Section* para isso basta clicar na opção *create Section* e escolher o formado *Shell* sendo que as peças são todas finas e defini-la com espessura 1.

Deve-se definir essa secção a peça de estado1, para seleccioná-la basta ir em *part* e no *dropdown* seleccionar o estado1. Tendo ela seleccionado basta clicar na opção abaixo da que criou a secção (*Assign Section*) para escolher a secção. Depois basta clicar na face da peça e clicar em *done* e depois OK.

Para juntar as partes precisa-se colocar no modo de montagem, basta ir no *dropdown* do *Module* e seleccionar *Assembly*. Clicando em *Create Instance* (primeira opção das ferramentas desse modo) irá perguntar quais peças adicionar, neste caso adiciona-se todas. Clique em *Apply* e depois OK.

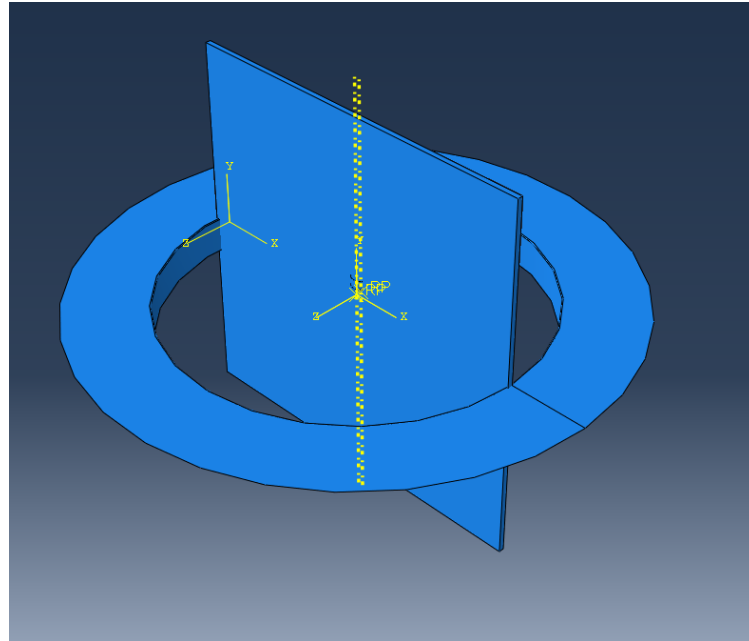


Figura 3.10 - peças juntas antes de posicionar

As peças agora estarão expostas nesse modo (figura 3.10) mas de forma desarrumada, para seguir em frente precisa-se definir a posição inicial das peças. Primeiro, rotaciona-se o suporte no sentido anti-horário do eixo X. Usando a função *Rotate Instance* e selecionando a peça final irá aparecer uma opção de coordenadas. Coloque 0,0,0 para definir qual ponto deve se rotacionar, depois 1,0,0 para definir o eixo X como eixo de giro e coloque 90° como ângulo de giro.

Seguindo as mesmas instruções anteriores, mas para a ponta de prova usando as coordenadas 0,0,0 como ponto de giro, 1,0,0 para rotacionar em relação ao eixo X e 90° como ângulo de giro. Como a ferramenta não irá começar no ponto central da chapa deve-se definir o ponto inicial dela como 60,0,0. Para isso use a ferramenta *Translate Instance* selecione a peça colocando 0,0,0 como ponto inicial e transladar 60,0,0.

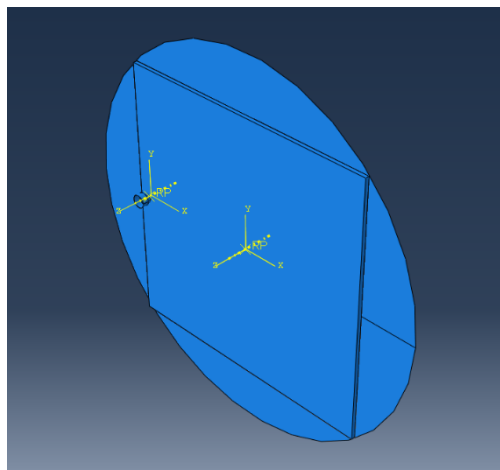


Figura 3.11 - posição final das peças

3.1.7. Adicionar passos da simulação

Precisa-se adicionar os passos da simulação. Para isso precisa entrar do modo de passos indo novamente no *dropdown* do *Module*, selecione a opção *Step*. Ao abrir escolhe a ferramenta *Step Manager* onde irá abrir todos os passos. Por padrão já vem com o *step* inicial.

Clicando em *Create...* vai começar a fazer o passo, deve-se configurar esse passo novo de *Dynamic*, *Temp-disp*, *Explicit*. Clicando em *Continue* irá aparecer os dados do passo, neste primeiro passo foi colocado um tempo de 0.01s para simbolizar o início da simulação.

O segundo passo que deve ser adicionado é o tempo da simulação para isso basta seguir o mesmo passo anterior e adicionar o tempo da simulação no campo.

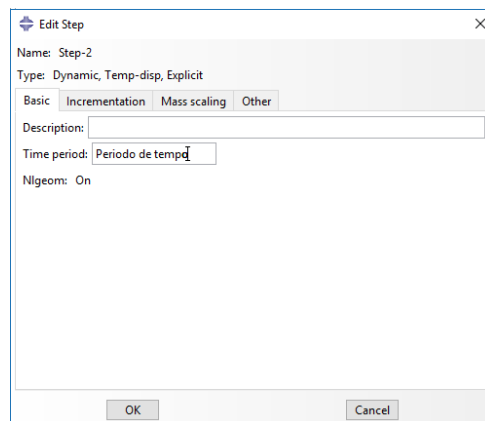


Figura 3.12 - Adicionar passo

3.1.8. Adicionar interação

Para adicionar as interações entre as peças da simulação precisa-se novamente mudar o modo de operação indo para *dropdown Module* e selecionando *Interaction*. Abrindo o menu, clicando em *Interaction Manager* aparece opção de criar essas interações clicando em *Create...* após isso selecione a opção *Surface-to-surface contact* e colocar no Step-1.

Agora deve-se escolher as faces que terão esta interação, primeiro escolha-se a ponta de prova com a chapa. Para isto basta selecionar a ponta de prova, onde logo depois o programa irá colorir a parte externa e interna da peça e perguntar qual cor deve ser feita a condicional. Logo depois, deve selecionar a chapa e o programa irá novamente colorir as duas faces, lembre-se de escolher a face que está voltada para cima da ponta de prova, assim basta clicar em okay.

Próxima condição de interação será entre a chapa e o suporte, para isto deve criar no mesmo estado que a anterior, mas desta vez escolher a parte inferior da chapa e a superfície superior do suporte.

O último passo para terminar é inserir os dados de atrito entre as peças, para isso vai-se em *Interaction Property Manager* e em *Create...* Seleccionando o tipo como *Contact* irá abrir uma janela parecida com a de adicionar propriedade do material, mas nesse caso adicionar *Tangential Behavior* que fica na aba *Mechanical* para colocar o coeficiente de atrito. A segunda propriedade será *Heat Generation* que está na aba *Thermal* e neste caso vai ser usado os dados default.

Lembrando que devesse criar dois casos de propriedades: um com atrito menor, que representa a ponta de prova imersa em lubrificante e outra maior para representar a peça em cima do suporte onde deve sofrer o menor deslizamento possível.

3.1.9. Adicionar condição de contorno

Para adicionar as cargas de força da simulação precisa-se novamente mudar o modo de operação indo para *dropdown Module* e seleccionando *Load*. Antes de adicionar a carga é necessário adicionar as condições de contorno, para isso basta clicar na opção *Bondary Condition Manager* e clicar no *Create...*

Voltando a criação da condição de contorno, será escolhido o tipo *Symmetry/Ansisymmetry/Encastre* e dar o nome BC-1-support pois será atribuído a esta peça, após criar precisa definir onde está condição de contorno será atribuída. Após isso escolhe que esta condição seja do Step-1 que foi o passo de inicialização de 0.01s que foi criado para este intuito.

A condição que será atribuída ao ponto de referência criado em relação a borda da peça inicial. Após isso se escolhe o CSYS que nesta condição será “Encastre”.

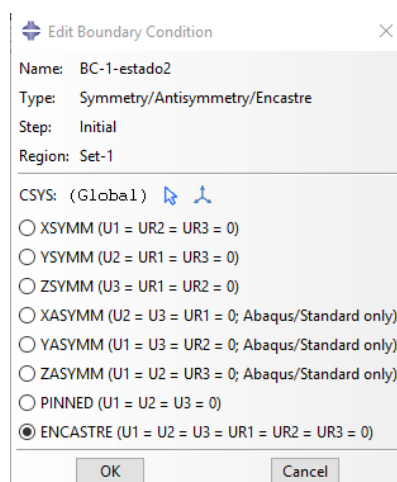


Figura 3.13 - Modo da primeira condição de contorno

Definindo agora a condição de contorno da peça estado um, deve criar 4 condições um para cada perímetro, duas para perímetro superior e inferior do eixo X e superior e inferior

do eixo Y. Após pedir para criar uma condição de contorno chama-se a primeira de BC-2-Estado1X e a segunda de BC-3-Estado1XX. Lembrando que o modo de criar a condição de contorno é o mesmo, basta selecionar o perímetro inferior a um e superior a outro.

Ao ser criado deve se escolher o tipo de *Displacement/Rotation*, após ser criado escolha a borda que desejar e ira aparecer uma janela com as coordenadas, neste caso será escolhido U1 como referencial do X.

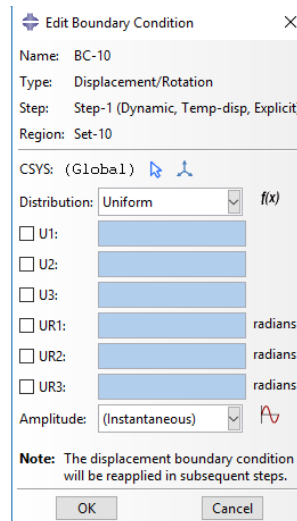


Figura 3.14 - Selecionar referência da condição de contorno

Para o eixo Y repete-se os mesmos passos anteriores, mas neste caso será escolhido U2 como o referencial da condição de contorno.

As últimas condições de contornos serão feitas em cima da ferramenta, para isso basta repetir o passo para criar uma condição de contorno e escolher novamente o tipo *Displacement/Rotation*. No caso da ferramenta serão 4 condições uma para cada eixo e uma para todos eixos de rotação. Para os primeiros 3 será parecido com o passo anterior.

Chamando de BC-6-PontaX(Y, Z) e para cada uma das condições criadas será selecionado o ponto de referência já criado anteriormente na peça e escolher U1 para X, U2 para Y e U3 para Z. Os eixos de rotação para serem inseridos será do mesmo modo anterior, mas na hora de escolher as referências escolhe UR1, UR2 e UR3.

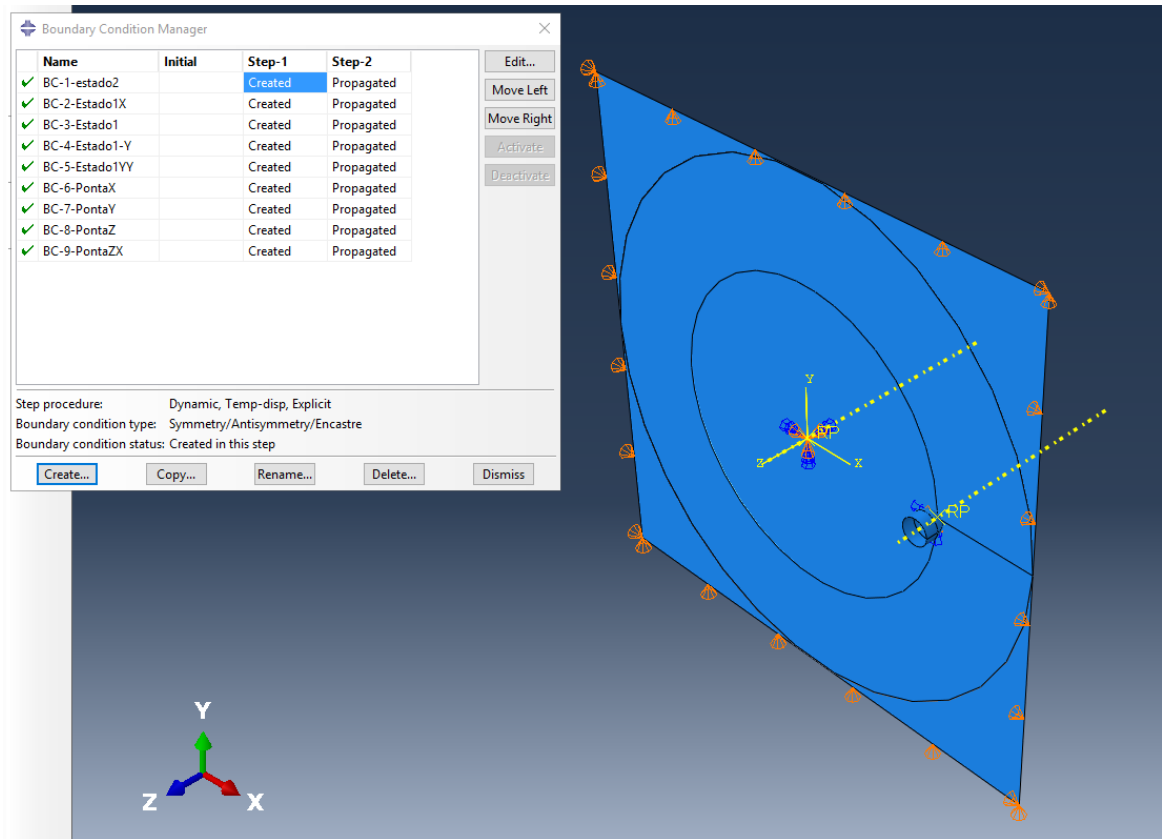


Figura 3.15 - Todas condições de contorno atribuídas na peça

3.1.10. Inserir caminho da ferramenta

Agora que os referências foram criados na condição de contorno, deve-se inserir as coordenadas dos eixos que a ferramenta irá percorrer, para achar o caminho a ser usado para ferramenta vai ser mostrado em outro passo.

Clicando com botão direito em *Amplitudes*, no quadro à direita nas opções de itens criados no projeto, clicas se em *Create* para criar uma amplitude que será atribuída a ferramenta. Após criar, deve-se nomear cada amplitude com as coordenadas dos eixos inseridos e seleccionar a opção *Smooth step*.

Logo após criar irá aparecer uma janela com uma tabela que deve ser preenchida com as informações de Tempo e Amplitude. Como está sendo atribuído as coordenadas de X foi inserido ela primeiro. Repete-se esse mesmo passo para adicionar as coordenadas Y e Z.

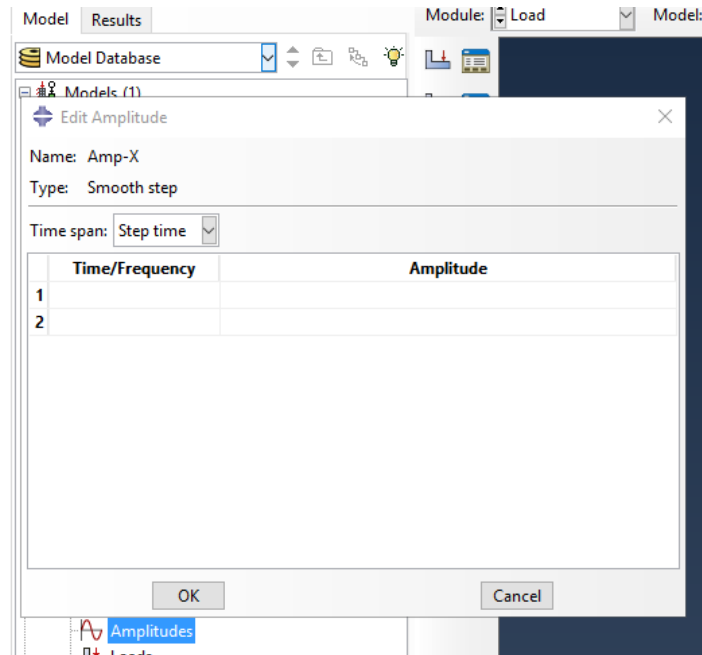


Figura 3.16 - Tabela para adicionar coordenadas do caminho da ferramenta

Com as coordenadas inseridas deve-se atribuir cada coordenada as condições de contorno criadas. Clicando em *Boundary Condition Manager* após abrir deve-se selecionar a condição de controle da ferramenta (Neste caso BC-6-PontaX, BC-7-PontaY e BC-8-PontaZ) em Step-2 que deve estar escrito *Propagated* e selecionar *Edit...* Quando clicar em *edit* basta colocar o valor de 1 na coordenada já escolhido para aquela condição e em *Amplitude* seleciona o referencial que está relacionado a coordenada que você está inserindo.

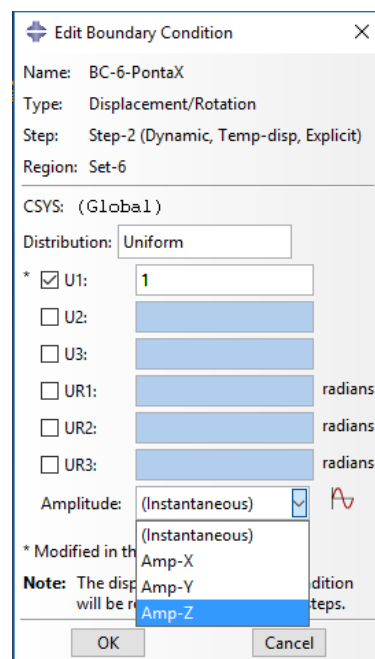


Figura 3.17 - inserindo coordenadas a referencial

3.1.11. Malhar o modelo

Para realizar a geração de malhas se usa o próprio método de malhagem do Abaqus que basta apenas definir o tamanho de cada cubo de seis faces que será gerado para realizar a simulação.

Como apenas a peça do estado1 será deformada, a malha será criada apenas para ela. Para isso deve-se mais uma vez alterar o modo de trabalho indo no *dropdown* do *Module* e selecionando a Opção *Mesh* logo após deve-se mudar para *Part* em vez de *Assembly* no radio *Object*, do lado do *dropdown* de *Module*, e selecionar a parte estado1 no *dropdown*.

Com a peça selecionada clica-se na opção *Seed Part* na barra de ferramentas e escolha um tamanho global de 2 e clica em ok. Depois de definir o tamanho da malha clica-se em *Mesh Part* para gerar a malha na peça.

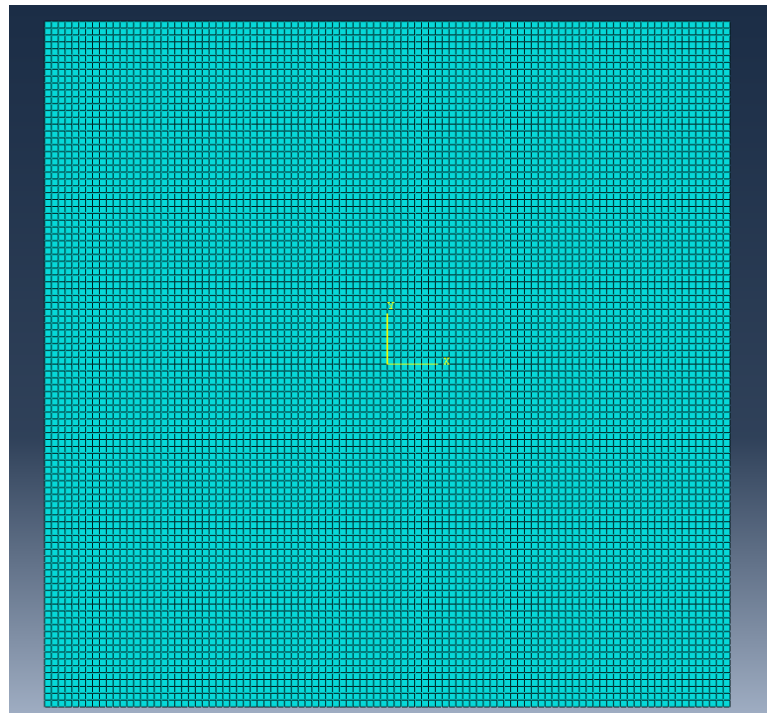


Figura 3.18 - Peça malhada com tamanho global 2

3.1.12. Gerar a simulação

Após terminar todos os passos pode-se gerar a simulação, mudando o modo para *Job* no *dropdown* do *Module* irá entrar no modo de gerar a simulação. Selecionando *Job Manager* e indo em *Create* para definir os parâmetros da simulação.

A única alteração que deve ser feita nos estados padrões é em *Precision* que se deve selecionar *Double – analysis only* no *dropdown* da opção *Abaqus;Explicit precissions*. Ao

terminar de criar basta selecionar a *Job* criada e escolher a opção *Submit* que a simulação será gerada.

3.2. Ensaio de Tração

O ensaio de Tração foi realizado em uma máquina MTS Landmark, e para realizar o ensaio foi usado um corpo de prova de Ti Comercial Puro de σ^2 , cortados de uma chapa metálica em formato de corpo de prova convencional deste ensaio.



Figura 3.19 - Máquina MTS Landmark

Para realizar o ensaio, o corpo de prova deve ser inserido na máquina com garras que segurem a peça de modo que ela não deslize para não ter grandes erros na medição. Após inserido na máquina um sensor de deslocamento é acoplado no centro da peça para ver o alongamento da peça. A força será medida pela própria máquina.



Figura 3.20 - corpo de prova pronto para experimento

Os dados de saída do experimento serão de força e alongamento, portanto precisa-se calcular agora a deformação e tensão aplicada ao corpo de prova para assim gerar o gráfico Tensão x Deformação e achar os dados desejados para o experimento.

3.3. Definir Caminho da ferramenta

O caminho da ferramenta que a máquina irá percorrer será extraído de um programa chamado Fusion 360. Este programa foi usado também por possuir uma versão gratuita de 30 dias para estudante.

O primeiro passo será criar a peça novamente, para isso cria-se um esboço da peça, porém diferente do Abuqus. Ele não possui a função Shell, portanto terá que possuir uma espessura, que no caso foi feito de 1mm. O esboço de software de CAM é bem semelhante para gerar, portanto basta seguir passos semelhantes ao dado anteriormente para realizá-lo. Lembrando que será esboçado apenas a peça de estado final.

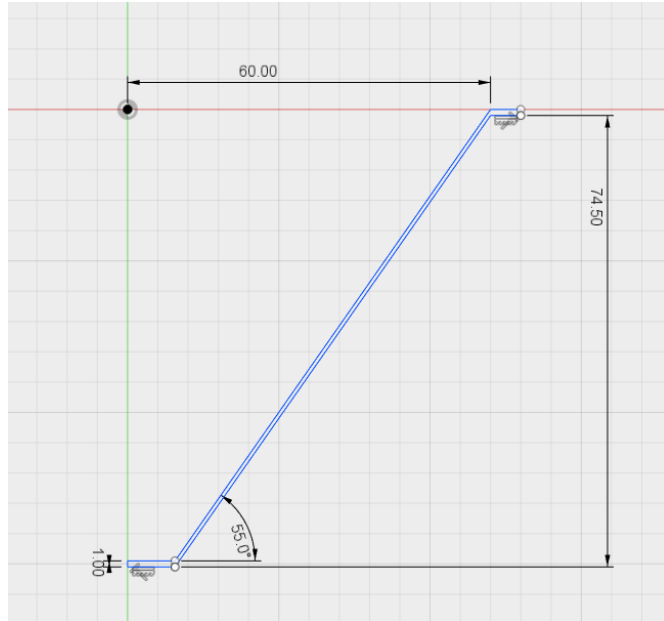


Figura 3.21 - Esboço com 1mm de espessura

Após gerar o Esboço, basta ir em *Create* e selecionar *Revolve* quando clicar em *revolve* ira aparecer uma janela pedindo para você selecionar o esboço que será rotacionado e em qual eixo, clicando okay a peça será gerada.

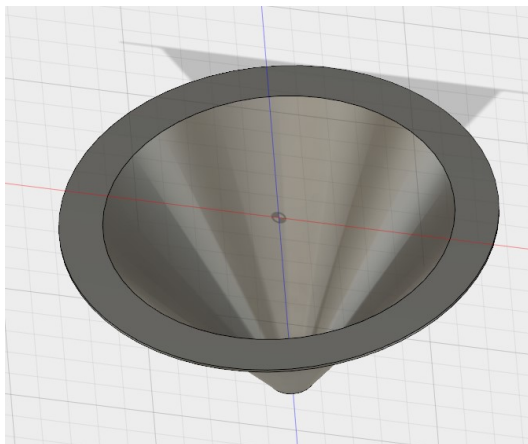


Figura 3.22 - peça gerada no Fusion 360

Com a peça gerada, selecione o modo CAM para poder gerar o caminho. Ao chegar neste modo como o movimento da ferramenta deve ser espiral, vai-se em 3D e escolha a opção espiral. Ao clicar nisso irá aparecer uma janela com 5 abas. Primeira coisa que deve ser configurada nesta aba é a ferramenta a ser utilizada. Como o foco é pegar o caminho tanto faz a ferramenta que será utilizada. A ferramenta que foi escolhida foi uma #1- ϕ 10mm ball.

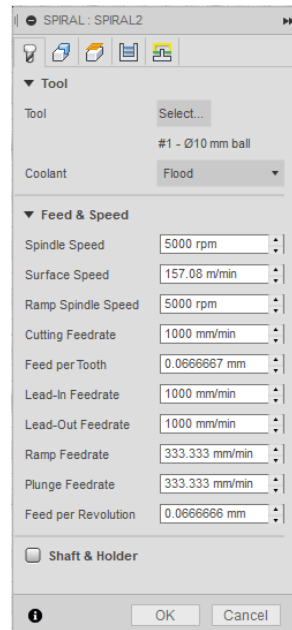


Figura 3.23 - Janela de adicionar caminho da ferramenta

Próximo passo é definir que a ferramenta passe só pela peça, para isso deve-se escolher a aba *Geometry* e em *Machining Boundary* Selecionar a opção *Silhouette*. Agora precisa definir o ponto de início da ferramenta, para isso escolha a aba *Linking* clique em *Entry Positions* e o programa irá esperar você escolher o ponto de início. Ao clicar OK o programa irá gerar o caminho e mostrar em azul na peça, caso deseje ver a ferramenta fazendo o percurso basta clicar em *Simulate*.

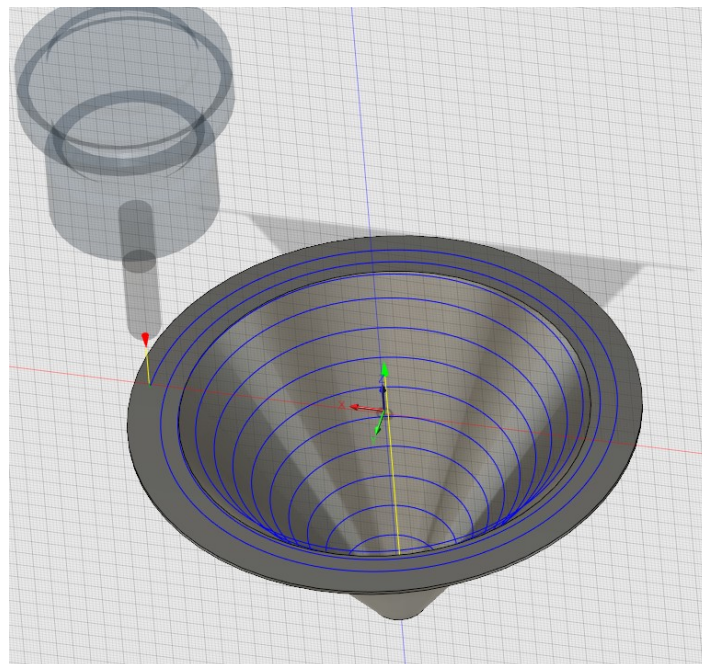


Figura 3.24 - Percurso gerado pelo programa

Como o programa não exporta o tempo de cada coordenada, e o Abaqus precisa dele, foi definido um tempo para cada um de acordo com o tempo da máquina. Para isso clique com

botão direito no trajeto criado e selecione *Machining Timing*. Aqui irá dizer o tempo total que irá demorar para ferramenta fazer a trajetória assim basta dividir pelo número de coordenadas que ela percorre que será dado no código G.

Agora basta ir em *Actions* Selecionar o *Post Process* que seu código G será gerado, assim basta extrair as coordenadas dentro do código, ou seja tirar todas as funções do código menos X Y Z, e inserir o tempo que cada uma será criada. Recomenda-se abrir dentro do Excel o arquivo .nc criado por já separar todos os comandos por células.

3.4. Parâmetros da Estampagem Incremental Utilizados na simulação real.

Segundo Silva (2011), os quatro parâmetros, avanço em Z, avanço em XY, deslocamento em Z e rotação, exercem influência direta sobre o acabamento superficial e o tempo gasto para conformação. Os parâmetros configurados para o pré-teste e para cada ensaio são mostrados na Tab. 2.

Ensaio n°		Ângulo de parede α [°]	Rotação [rpm]	Passo vertical d_z [mm]	v_A [mm/min]
Pré-teste	1	45	0	0,5	500
Testes	2		100		1000
	3		500		1000
	4		1000		1000

Tabela 2 - Parâmetros usados nos experimentos realizados por Tenani (2018).

Para o pré-teste optou-se por não utilizar nenhum fluido lubrificante a fim de verificar nos próximos testes qual o impacto que a lubrificação exerce no processo, além disso a ferramenta movimentava-se sem rotação.

Para os ensaios n° 2, 3 e 4 a ferramenta foi substituída, sendo utilizada a ferramenta com a ponta de aço, pois a ferramenta com ponta de TEFLON® sofreu deformação após o pré-teste, dessa forma, inviabilizando seu uso em testes posteriores visto que havia somente uma ferramenta deste tipo à disposição.

No ensaio n° 2 aplicou-se lubrificante do tipo vaselina spray fabricada pela empresa Vonder e também vaselina líquida do fabricante Worker sobre a superfície da chapa a ser estampada. A vaselina spray possui excelente resistência a água, boa proteção contra oxidação e um alto poder de lubrificação enquanto a vaselina líquida é indicada para aplicações diversas. Já nos ensaios n° 3 e n° 4 foi utilizado como lubrificante o óleo hidráulico 68 Ipiranga Ipiratur AW 68 que é um óleo mineral parafínico contendo aditivos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a metodologia adotada no Capítulo 3. Este foi dividido em duas partes: a primeira refere-se aos resultados do ensaio de tração que será usado no próximo passo. A segunda refere-se ao resultado obtido pela simulação realizado no Abaqus.

4.1. Resultados do ensaio de Tração

O gráfico de Tensão x Deformação está mostrado na Figura 4.1, nele consegue-se extrair quase todos os dados necessários para definir as propriedades do material a ser simulado no Abaqus.

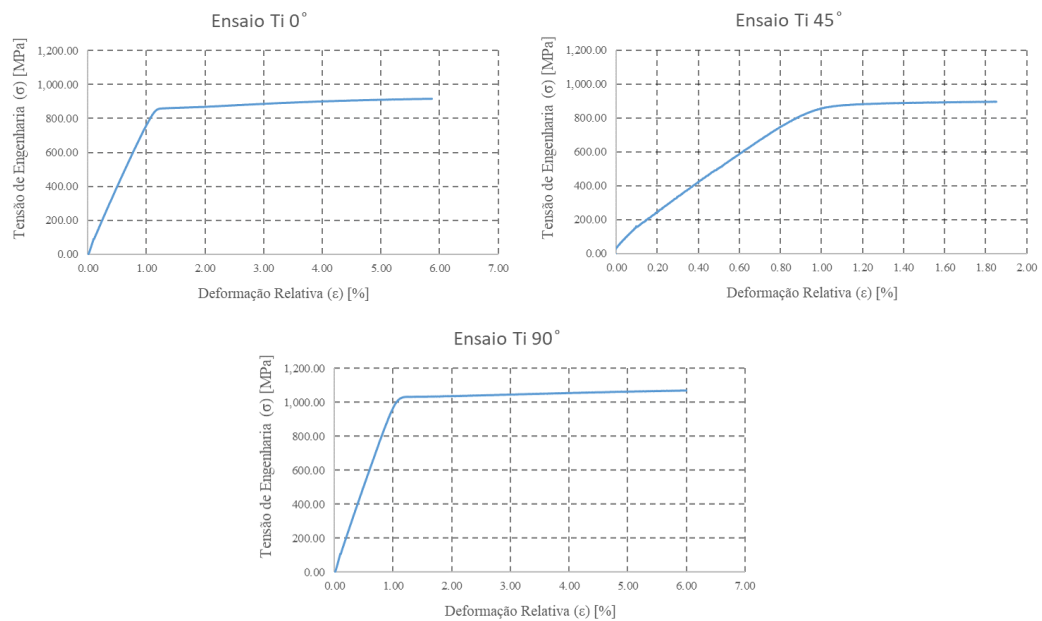


Figura 4.1 - Gráfico Tensão x Deformação Ti

Olhando os dados necessários para definir os parâmetros de material necessário para simulação neste gráfico pode extrair 3 dos 6 dados. Sendo está densidade, calor específico e coeficiente de Poisson. Portanto estes dados foram tirados do *Material Property Database*.

Mesmo sendo que o coeficiente de Poisson seria possível ser retirado deste tipo de ensaio não foi pego as informações de deformação longitudinal pelo fato de o corpo de prova ser muito fino para acoplar um sensor de deformação neste sentido, além de ser melhor pegar esta informação por ensaio de compressão.

Olhando os pontos que foram explicados no Capítulo II pode achar os dados de:

Módulo de Elasticidade: $E = 998,3 \text{ MPa}$

Critério de von misses: $1035,3 \text{ MPa}$

Os outros valores que serão inseridos nos dados plásticos são inseridos como matriz, ou seja, os valores são extraídos da curva gerada no regime plástico e inseridos como parâmetro.

O regime plástico retirado do ensaio possui um comportamento diferente do esperado, esperava que o titânio logo após entrar no regime plástico iria romper. Portanto isso acaba não acontecendo nos ensaios.

Olhando o corpo de prova após o ensaio pode se confirmar que praticamente não houve regime plástico por conta de haver quase nenhum estriamento nele. Isso acontece por conta do escorregamento do corpo de prova nas garras que o seguraram ao final do ensaio, e

observando as bases do corpo se vê alguns arranhados gerados que foram gerados pelo escorregamento dele.

Medindo os arranhões pode-se calcular a deformação medida a mais por conta deste escorregamento e assim escolhendo uma matriz melhor para inserir no programa para gerar a simulação.

Considerando que houve uma deformação por conta deste escorregamento de aproximadamente 4mm, pois medindo 2mm causado pelos arranhões vezes 2 por haver escorregamento nas duas agarras.

Assim tem se uma deformação total de 1mm do material. Podendo assim retirar todos os valores acima de 1,5% dos gráficos. Abaixo pode-se ver os gráficos após as correções.

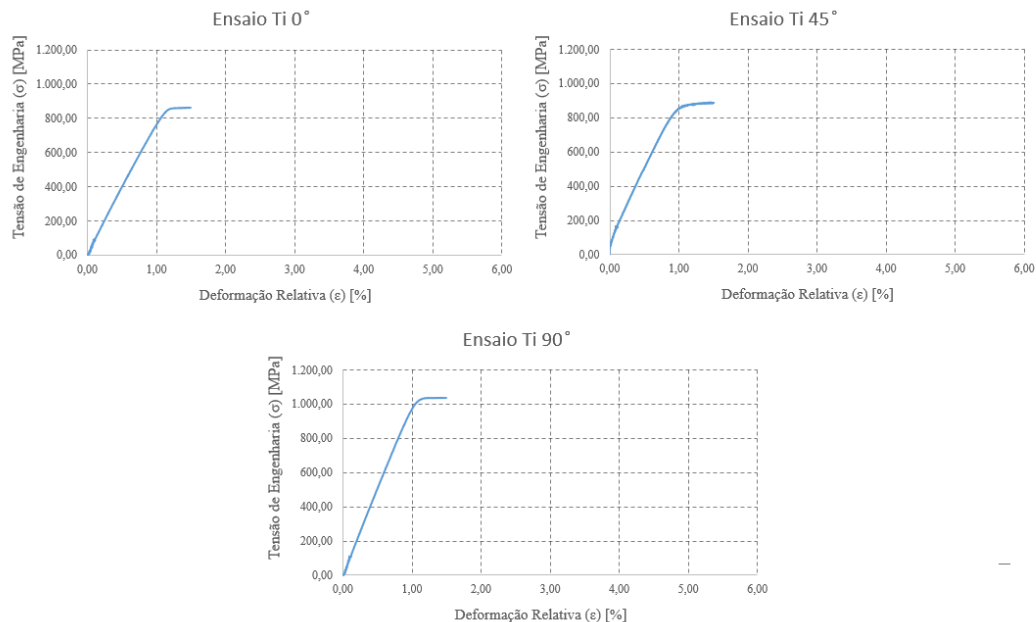


Figura 4.2 - Gráfico Tensão x Deformação Ti corrigido

Após retirar todos estes valores pode-se usá-los para inserir na simulação, para tentar ter um resultado mais perto do que será feito no laboratório. Isso por usar os valores do material do lote de Titânio que o laboratório possui em vez de valores padrões.

Outra propriedade que pode ser achada durante esse ensaio é achar o índice de anisotropia planar da chapa, assim pode entender melhor como a chapa irá comportar conformando em várias direções.

$$\text{Anisotropia planar: } \Delta r = 2,075$$

4.2. Resultados da simulação de conformação a ponto do Ti

Sabendo que o coeficiente de atrito utilizado para contato entre peça e superfície é 0.5 pois, precisa haver um escorregamento para deformação da peça. E o coeficiente usado entre a ferramenta e a chapa foi de 0.15 considerando que este valor é utilizado quando se possui uma superfície lubrificada. Os resultados obtidos pela simulação podem ser visualizados na Figura 4.3.

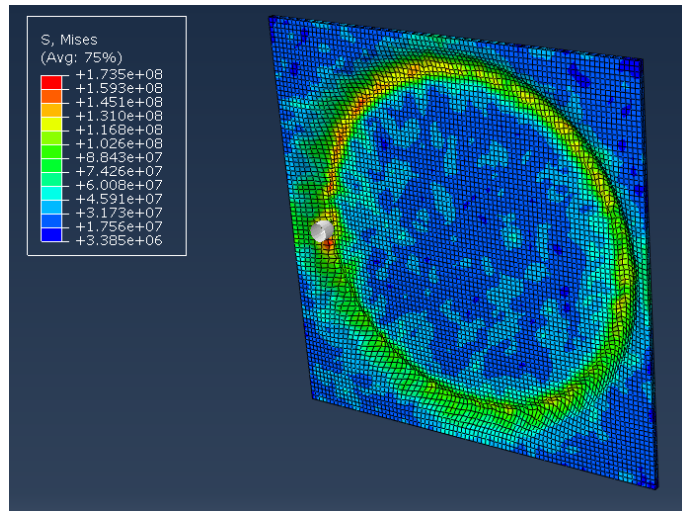


Figura 4.3 - Resultado Simulação

Pela imagem pode-se ver o que já era esperado: que como o regime elástico do Titânio é pequeno a profundidade que se consegue fazer conformando é muito baixa ou seja já se esperava que a placa não iria conseguir atingir os 74,5mm de profundidade. Fica claro ao observar a imagem acima onde já aparece pontos críticos na simulação e podendo ser até um ponto onde o material comesse a falhar.

Olhando por outro angula mostrada na figura 4.4 pode se ver que essa profundidade, obtida pelo ensaio, realmente foi baixa como esperado de um material com pequena propriedade plastica.

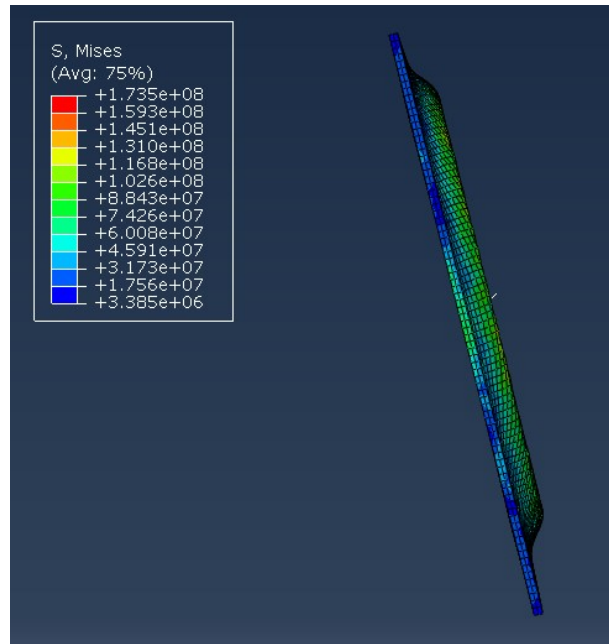


Figura 4.4 - vista lateral da simulação

Ao extrair os dados da posição cartesiana no final do ensaio chega a o resultado da profundidade total, que neste caso foi de 9,6mm.

4.3. Comparando resultados da simulação com os reais obtidos em outro trabalho

Olhando o ensaio S2 (Figura 4.5) pois foi o ensaio que teve maior profundidade entres os três testes realizados pelo Tenani (2018), observa que a chapa se rompeu antes de atingir 60 mm de profundidade (como visto na simulação), conforme mostra a Figura 4.5. Embora este teste também não tenha sido concluído com sucesso devido ao surgimento de ruptura na chapa, com rompimento da chapa à profundidade de 10,41 mm.

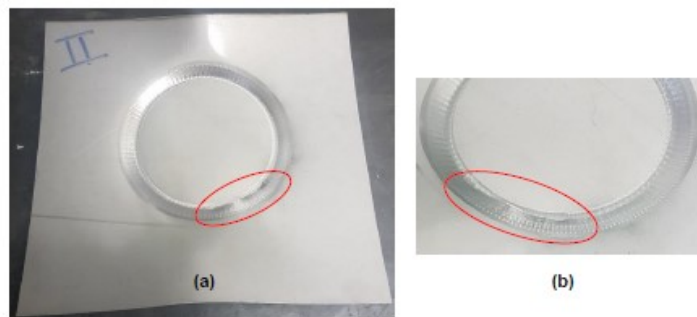


Figura 4.5 - a) Corpo de prova do ensaio nº 3. b) Detalhe do rompimento tipo fratura.

Mesmo o objetivo de profundidade dos testes sendo diferentes a comparação dos dois resultados obtidos é válida já que era esperado que um material com regime plástico pequeno estaria longe de atingir a profundidade tanto de 60mm quanto 74,5mm.

Pode ver que os resultados obtidos tanto da simulação quanto do ensaio foram bem próximos chegando a um erro de 7,78%. Os erros gerados pela simulação para ter a diferença de quase 1mm pode ser atribuído à:

- Um uso errado da curva plástica já que por conta do escorregamento foi preciso fazer uma dedução e retirar alguns pontos da reta;
- Caminho utilizado durante a simulação;
- A simulação não leva em consideração a rotação da ferramenta e como mostrado nos outros experimentos realizados pelo Tenani (2018) de acordo com isso pode variar a profundidade;
- Valores de coeficiente de atrito entre a ferramenta e a chapa possuem valores diferentes entre o resultado real e simulação.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Pode-se concluir a necessidade de criar um modelo virtual para poder diminuir a quantidade de ensaios reais necessários para achar a força/comprimento ideal para o material não chegar no ponto de rompimento. Essa necessidade se vem pelo fato de o titânio ser um material caro.

Sabendo que o Abaqus, por ser muito usado como sistema de simulação, possui muitas comparações com ensaios reais e tendo assim uma confiabilidade muito grande e vários resultados muito similares com os testes reais.

Mesmo o resultado mostrando que a conformação a ponto neste material não consegue ultrapassar grandes profundidades esse processo de fabricação ainda pode ser valido.

Como a maioria das peças que usam o titânio são para uso medicinais como implantes ortopédicos, próteses e instrumentos odontológicos etc., pelo fato de o corpo não considerar o titânio como um corpo estranho. As peças possuem um tamanho pequeno para poder caber dentro do corpo, assim sendo valido esse método de fabricação já que não será preciso conformações de grande escalas.

Referências Bibliográficas

A.J. Benítez Lozano, G.J. Páramo Bermúdez and F.A. Bustamante Correa, “Comparative Analysis Between the SPIF and DPIF Variants for Die-less Forming Process for an Automotive Workpiece,” INGE CUC, vol. 11, no. 2, pp. 68-73, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.17981/ingecuc.11.2.2015.07>

Azevedo, Álvaro F. M. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Abril de 2003

Câmara, João Luís Padrão de Brito, Single Point Incremental Forming, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre – Universidade Técnica de Lisboa 2009

Giacchini, Breno. Uma breve introdução ao Método dos Elementos Finitos Departamento de Matemática | Instituto de Ciências Exatas | Universidade Federal de Minas Gerais, Janeiro de 2012

J. Câmara, Single Point Incremental Forming, Instituto Superior Tecnico, T. U. Lisbon, Portugal, 2009

J. Naranjo, V. Miguela, A. Martínez-Martínez, L.M. Gómez-López, M.C. Manjabacas, J. Coello, Analysis and simulation of Single Point Incremental Forming by ANSYS®. 2015, The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2015

Kumar ,Yogesh and Kumar,Santosh, Incremental Sheet Forming (ISF), Springer India 2015

Loral ,Fabio Andre and Schaeffer,Lirio Incremental forming process strategy variation analysis through applied strains, Brazilian Journal of Science and Technology 2014.

M. B. Silva¹, M. Skjoedt, P. A. F. Martins¹ and N. Bay, SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING OF METAL SHEETS, ResearchGate, 2009

MASCIA,N. TRAÇÃO, COMPRESSÃO E LEI DE HOOKE , UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,ARQUITETURA E URBANISMO, Junho de 2006

Material Properties Database([PVD Titanium](http://www.mit.edu/~6.777/matprops/titanium.htm)). Disponível em: < <http://www.mit.edu/~6.777/matprops/titanium.htm> > Acesso em: 25/1/2017.

Mundo CNC. Disponível em < <http://mundocnc.com.br/basic7.php> >. Acesso em 22/1/2018.

Prof. João Paulo P. Marcicano, Introdução ao Controle Numérico, 2015

Simulation SPIF in Abaqus. Disponível em: < https://www.youtube.com/watch?v=aGhBx6_ZNZ4&t=1s > Acesso em: 16/2/2017.
TiBrasil Titânio Ltda.. Disponível em <<http://www.titanio.com.br/caracter.htm> >. Acesso em 15/10/2017.

A Estampabilidade dos Materiais Metálicos <
https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6487-a-estampabilidade-dos-materiais-metalicos#.WzO5X9JKiUk >. Acesso em 27/6/2018.

Tenani, Luís Otávio Brás Tenani, FABRICAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS EM CHAPAS FINAS DE LIGA DE TITÂNIO TI6AL4V USANDO O MÉTODO DE ESTAMPAGEM INCREMENTAL, Defesa de trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Ubrelândia – 2018.