

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DO MÉTODO *STACK COMPRESSION* PARA OBTENÇÃO DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS APLICADO A DISCO DE ALUMÍNIO
PARA FABRICAÇÃO DE CANECAS

por

Gabriel Campos Bacellar

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Bacellar, Gabriel Campos
ANÁLISE DO MÉTODO STACK COMPRESSION PARA OBTENÇÃO
DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS APLICADO À
DISCO DE ALUMÍNIO PARA FABRICAÇÃO DE CANECAS / Gabriel
Campos Bacellar. -- 2022.
30 f.
Orientador: Rodrigo Rossi.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Ensaio mecânico de materiais. 2. Teste de
discos empilhados. 3. Modelamento numérico. I. Rossi,
Rodrigo, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gabriel Campos Bacellar

ANÁLISE DO MÉTODO STACK COMPRESSION PARA OBTENÇÃO DAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS APLICADO A DISCO DE ALUMÍNIO
PARA FABRICAÇÃO DE CANECAS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Rodrigo Rossi

Comissão de Avaliação:

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, maio de 2022

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus Pais e familiares pelo aporte fornecido durante toda a formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus Pais e familiares pelo apoio incondicional, a Natielle e seus familiares pelo carinho e cuidado, aos amigos Francisco e Felipe que sempre estiveram ao meu lado, ao GMAP por disponibilizar sua estrutura para realização dos ensaios e ao demais colegas, professores e funcionários da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

APOIO FINANCEIRO

O autor agradece ao apoio dado pela empresa TDK Electronics do Brasil LTDA pelo fornecimento de amostras de peças usinadas.

EPÍGRAFE

“Uma experiência nunca é um fracasso, pois sempre vem demonstrar algo.”
Thomas Alva Edison

Bacellar, C. G. **Análise do método *stack compression* para obtenção das propriedades mecânicas de materiais aplicado a disco de alumínio para fabricação de canecas.** 2022. 30 f. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

O desenvolvimento de novas tecnologias tanto na área de novos materiais como na área dos processos de fabricação por muitas vezes encontra barreiras que dificultam sua execução. Uma delas é a dificuldade de realizar ensaios para caracterizar a matéria prima tal como fornecida por terceiros, dessa forma é necessário buscar soluções que possibilitem avaliar esses materiais de maneira alternativa e confiável, para tanto, esse trabalho tem como objetivo caracterizar a matéria prima utilizada na produção de canecas de alumínio empregadas na fabricação de capacitores e comparar tanto com os dados repassados pelo fornecedor quanto o resultado da simulação numérica utilizando um software de elementos finitos. Devido à forma e às dimensões do material fornecido, foi utilizado o método de *Stack Compression* no qual o ensaio de compressão convencional com corpo de prova cilíndrico dá lugar a um o corpo de prova em formato discos de mesmo diâmetro, esses discos são empilhados de maneira a possibilitar uma maior deformação permitindo uma melhor caracterização do material. Os resultados dos testes mecânicos demonstraram que o método é viável para obtenção da curva de escoamento sendo uma alternativa frente ao ensaio convencional de tração. A verificação numérica evidenciou que pequenos desalinhamentos não interferem nos valores das curvas de força x deslocamento até uma dada faixa de deslocamento, apesar de implicar em tensões não homogêneas na amostra.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios mecânicos de materiais; Teste de discos empilhados; Modelamento numérico.

Bacellar, C. G. **Analysis of the stack compression method to obtain the mechanical properties of materials applied to aluminum slug for the manufacture of can.** 2022. 30 p.– Mechanical Engineering End of Course Monography - Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

The development of new technologies, both in the area of new materials and in the area of manufacturing processes, often encounters barriers that make its execution difficult. One of them is the difficulty of carrying out tests to characterize the raw material as supplied by third parties, so it is necessary to seek solutions that make it possible to evaluate these materials an alternative and reliable way, therefore, this work aims to characterize the raw material used in the production of aluminum can used in the manufacture of capacitors and compare both with the data passed on by the supplier with the result of the numerical simulation using a finite element software. Due to the shape and dimensions of the material supplied, the Stack Compression method was used, which the compression test in conventional with a cylindrical specimen gives rise to a specimen in the form of discs of the same diameter, these discs are stacked in order to allow a greater deformation allowing a better characterization of the material. The results of the mechanical tests showed that method is viable to obtain the stress-strain curve is an alternative to the conventional tensile test. Numerical verification showed that small misalignments do not affect the values of force and displacement curves up to a given displacement range, despite implying non-homogeneous stresses in the sample.

KEYWORDS: Mechanical testing of materials; Stack compression test; Numerical modeling.

NOMENCLATURA

Símbolos

A	Área final	[mm ²]
A_0	Área inicial	[mm ²]
d	Altura final	[mm]
d_0	Altura inicial	[mm]
F	Força	[N]
h	Altura final	[mm]
h_0	Altura inicial	[mm]
Hz	Frequência	[ciclo/s]
m_f	Atrito na face da matriz	
m_d	Atrito entre os discos	
t	Tempo	[s]

Símbolos gregos

σ_v	Tensão verdadeira	[Mpa]
ϵ_v	Deformação verdadeira	[mm/mm]

Abreviaturas e acrônimos

cp	Corpo de prova
GMAP	Grupo de Mecânica Aplicada
ln	Logaritmo natural

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO	2
3. METODOLOGIA	4
3.1. CORPOS DE PROVA	4
3.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO	5
3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA	6
4. RESULTADOS	8
4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	8
4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	11
5. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO E ELASTOPLÁSTICO DO MATERIAL	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática do ensaio de compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica. Adaptado de Sequeira (2017).	2
Figura 2 - Dimensional das pastilhas de alumínio. a) Material como recebido; b) Corpo de prova final.....	4
Figura 3 - Fluxo de processo do ensaio de conformação	5
Figura 4 - Montagem do CP-1 após a retirada da fita antes do início da compressão.	5
Figura 5 - Montagem dos componentes da simulação para o caso dos cilindros empilhados. ..	6
Figura 6 - Representação das condições de contorno para a simulação, axissimetria 2D, deslocamento prescrito em RP-1 e engaste no RP-2.	7
Figura 7 - Figura 7 - Esquema para demonstrar a penetração devido a uma discretização grosseira. Fonte: adaptado <i>Abaqus® documentation version 6.6</i>	7
Figura 8 - Comportamento da Força x Deslocamentos para os ensaios utilizando estearato de zinco como lubrificante.	8
Figura 9 - Imagens do ensaio para o cp-1: a) antes da compressão e b) após início da flambagem.	9
Figura 10 - Comportamento da Força x Deslocamento para os ensaios que utilizaram óleo como lubrificante.	9
Figura 11 - Comportamento da Força x Deslocamento para os ensaios com avaliação da diferença percentual da força em função da deformação verdadeira.	10
Figura 12 - Comportamento das curvas de escoamento do material como recebido e dos valores experimentais para as melhores condições de ensaio	11
Figura 13 - Comportamento das energias cinética e estática no corpo deformado com $t=0.01$ s	12
Figura 14 - Detalhe das condições de montagem e contato para cada um dos casos simulados.	12
Figura 15 - Valores de força x deslocamento dos casos 1 e 2 em comparação ao valor experimental do cp-3	13
Figura 16 - Comportamento da distribuição da tensão para as diferentes condições de contato a) contato não deslizante caso 4; b) contato com atrito $md=0,2$ caso 5.....	13
Figura 17 - Comparação de força x deslocamento do cilindro sólido em comparação com os diferentes contatos entres as faces dos cilindros empilhados.	14
Figura 18- Distribuição das tensões após a compressão casos com simetria xz ; a) valores de tensão para o caso 6; b) valores de tensão para o caso 7	14
Figura 19 - Comparação da condição numérica com simetria xz , experimental e numérica sem simetria zx	15
Figura 20 - Exemplo da utilização do recurso de calibração de curvas para caracterização do comportamento elástico e elastoplástico do material no <i>software Abaqus®</i> . Fonte: <i>software Abaqus Student®</i>	17

1. INTRODUÇÃO

O mercado automotivo é um setor que apresenta constante mudança impulsionada pelos seus usuários que estão cada vez mais exigentes, buscando o aumento na segurança assim como o aumento na eficiência no uso dos recursos naturais e um melhor aproveitamento da nossa matriz energética. Os novos projetos que atendem esse nicho vêm ganhando cada vez mais complexidade. Nesse universo de componentes que estão presentes nesses veículos pode-se destacar um deles, o capacitor, que apesar de pouco conhecido, com o advento da eletrônica embarcada, se tornou essencial pois ele garante o funcionamento automático de diversos desses sistemas, como por exemplo air bag, piloto automático, sistema de recuperação de energia cinética, módulo de injeção e ignição eletrônica, módulo de tração entre outros. [Farias, P. V (2012)]

O projeto de um novo veículo, assim como a concepção de um novo capacitor abrange a parte do desenvolvimento de novas tecnologias, tal desenvolvimento exige o conhecimento das características elétricas e mecânicas do componente, de forma a ser possível estabelecer seus limites de funcionamento assim como sua aplicação, evitando dessa forma subestimar ou superestimar seu uso no projeto final. [Alves, A, P. (2019)]

A construção do capacitor eletrolítico pode ser simplificada por 3 componentes principais, a bobina responsável por dar as características elétricas como a capacitância, o eletrólito responsável por fornecer íons para a passagem da corrente elétrica e o encapsulamento formado pela caneca de alumínio e um disco compósito, esses, responsáveis por proteger a bobina, manter o eletrólito e os gases provenientes da utilização do capacitor armazenados de forma a garantir a vida útil do componente. Dessa forma o projeto da caneca é um fator importante para o correto funcionamento do produto, sendo ele então alvo de interesse para os novos desenvolvimentos.

A caneca é obtida por meio da conformação mecânica de uma pastilha de alumínio que posteriormente é submetida à um corte para ajuste dimensional, por tanto para o correto modelamento desses processos o dado mais importante são as curvas de escoamento do material pois ela caracteriza o encruamento e determina as força e o trabalho de um processo. [Alves et al. (2011)]

As propriedades mecânicas de um material podem ser obtidas por diversos tipos de ensaio, um deles é a partir da compressão de um corpo de prova cilíndrico, esse, amplamente difundido e utilizado principalmente por permitir avaliar a resposta do material quando submetido deformações maiores do que quando comparado, por exemplo, ao ensaio de tração devido à ausência da estrição além de se assemelhar com os processos a qual o material será submetido: forjamento, laminação e conformação processos que estão associados geralmente a alta cargas de compressão. Alves et al. (2011). Entretanto no ensaio de compressão surgem outras dificuldades, como por exemplo o efeito do atrito entre os pratos da máquina e o corpo de prova, responsável pelo efeito de barrilamento da amostra, e também a flambagem do mesmo.

A dificuldade de realizar ensaios para caracterizar a matéria prima tal como fornecida por terceiros, foi o que motivou Pawelski, (1967) a propor um ensaio alternativo, que foi denominado com *Stack Compression*, ou de discos empilhados em uma tradução livre para o português. O teste utiliza discos circulares e empilhados para formar um cilíndrico com uma proporção na faixa dos cilindros sólidos atualmente empregado no teste de compressão convencional. [Alves et al. (2011)]

Esse trabalho tem como objetivo obter a curva de escoamento das pastilhas de alumínio utilizada para a fabricação de canecas aplicadas na produção de capacitores eletrolíticos, tal

como recebida, utilizando o teste *Stack Compression* e comparando com os valores obtidos na simulação numérica utilizando um software de elementos finitos e também com os dados disponíveis entregues pelo fornecedor verificando a aplicabilidade desse método.

2. FUNDAMENTAÇÃO

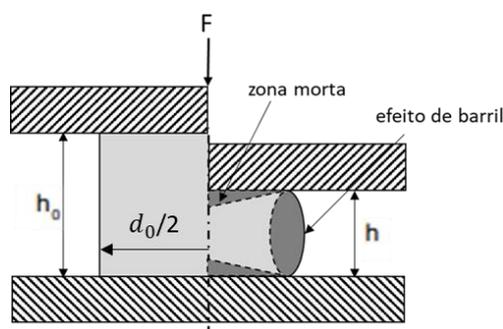
Primeiramente foi realizado uma revisão bibliográfica. Optou-se então pela estratégia de utilizar o método de *Stack Compression* assim como o Alves et. al (2011), para melhor entender a influência de utilizar um material segmentado para obter as propriedades mecânicas por meio de um ensaio de compressão, devido a impossibilidade de realizar outro ensaio padronizado em virtude da geometria do material em análise.

Do ponto de vista da conformação mecânica, a curva de escoamento é uma das informações mais importantes, pois ela revela de maneira gráfica o comportamento do material durante o escoamento, esse dado é muito valioso para os projetos e de essencial importância para o correto modelamento de um estudo numérico computacional.

O processo de obtenção da curva de escoamento é dependente de vários aspectos a exemplo da direção do carregamento e a geometria do corpo de prova, essa dependência pode motivar a escolha do ensaio mais adequado considerando a condição real na aplicação do material em análise, dessa forma um dos ensaios mais difundido é o de compressão devido justamente a sua similaridade com os processos de fabricação que utilizam conformação à frio como laminação, trefilamento e forjamento. Outro motivo que justifica a sua escolha é a ausência da formação da estrição que ocorre durante os ensaios de tração que dificulta a obtenção dos dados durante o regime de deformação plástica informação fundamental para os processos de conformação. [Hatwig (2015)]

Apesar de mais simples na avaliação, o ensaio de compressão também apresenta dificuldade em sua aplicação, uma das principais é o atrito entre as placas planas e a face da amostra, esse atrito impede que as superfícies se deformem livremente resultando em uma força adicional devido a triaxialidade da tensão, o que leva o corpo de prova a ter um formato de barril, tal como mostrado na Figura 1 na qual h_0 é a altura inicial do corpo de prova, F a força aplicada e h a altura após a deformação.

Figura 1 - Representação esquemática do ensaio de compressão uniaxial de uma amostra cilíndrica. Adaptado de Sequeira (2017).



Esse feito tem influência nos valores da força necessária para realizar a compressão e deve ser evitado, dessa forma a razão h_0/d_0 , é um parâmetro importante para a correta obtenção da curva pois Gunasekera et al. (1989) verificou que há relação desse parâmetro com o atrito, na qual os corpos de prova com a razão menor que 1 apresentaram uma grande influência do atrito. Além disso, foi possível observar que as amostras com a razão maior do que 3 estavam sujeitas

a instabilidade podendo apresentar flambagem durante a compressão. Dessa forma para uma correta avaliação é preciso respeitar a razão de aspecto $1 \leq h_0/d_0 \leq 3$, sendo h_0 a altura inicial e d_0 o diâmetro inicial do corpo de prova

Na execução do ensaio de compressão são registrados os dados de força e deslocamento em função do tempo, de forma a ser possível obter os valores de tensão-deformação. A relação utilizada para obter a tensão verdadeira, σ_v , para cada instante é mostrada na equação 2.1, na qual, A corresponde a área corrigida ou área instantânea que pode ser obtida pela relação da redução da altura considerando a conservação de volume conforme a equação 2.2 e F a força instantânea.

$$\sigma_v = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. 2.1}$$

$$A = A_0 \times \frac{h}{h_0} \quad \text{Eq. 2.2}$$

A deformação verdadeira instantânea, ϵ_v , é calculada a partir da relação da altura inicial e a altura instantânea h_0 e h , respectivamente, ou por meio da área inicial A_0 e a área instantânea A , conforme demonstra a equação 2.2.

$$\epsilon_v = \ln \ln \frac{h}{h_0} = \ln \ln \frac{A_0}{A} \quad \text{Eq. 2.3}$$

Apesar das boas práticas avaliadas por Gunasekera et al. (1989) para evitar a influência do atrito e da instabilidade, no que diz respeito a razão de aspecto do corpo de prova, o atrito é um fator importante e precisa ser considerado, dessa forma como propõem Sequeira (2017) foram avaliadas condições diferentes lubrificações para fins comparativos.

É necessário salientar que o método experimental proposto por Pawelski (1967) é um procedimento alternativo para obter a curva de escoamento das matérias primas tal como recebidas. Nesse método são empilhados discos de mesmo diâmetro de maneira a obter uma amostra cilíndrica com uma proporção na mesma condição dos testes aplicados aos cilindros sólidos. Por não ser um ensaio padronizado até o momento não recebeu tanta atenção dos pesquisadores quanto os demais testes padronizados conforme verificou Alves et al. (2011). Entre as pesquisas mais recentes sobre o tema pode-se citar o trabalho de Siqueira (2017) que utilizou o método para avaliar a influência do atrito na conformação multicamadas que vem ganhando cada vez mais significância devido ao aumento na produtividade, assim como o trabalho de Hochholdinger et. al (2009) que realizou um ampla pesquisa utilizando o método de Pawelski (1967) aplicado para conformação à quente, avaliando também diferentes modelos matemáticos para considerar a influência da temperatura no processo de conformação multicamadas.

Assim como na pesquisa de Alves et al. (2011), a análise realizada por elementos finitos não considera a deformação individual de cada uma das camadas do corpo de prova, sendo assim os valores considerados para análise das amostras com disco empilhados foram tratados como um cilindro sólido.

Dentro do que foi mostrado até agora é possível destacar dois objetivos principais para esse trabalho, a) obter a curva de escoamento através do método *stack compression*, avaliando as influências e dificuldades de realizar o ensaio em um corpo de prova multicamadas e b) verificar as diferenças entre a resposta do corpo sólido e do corpo multicamadas no modelo numérico comparando com os valores experimentais.

Os ensaios foram realizados em laboratório e a avaliação por meio de elemento finitos teve sua metodologia descrita para que seja possível a sua reprodução, espera-se que seja possível

umentar a compreensão sobre o tema auxiliando quem necessitar utilizar o método *stack compression* para caracterização de materiais.

3. METODOLOGIA

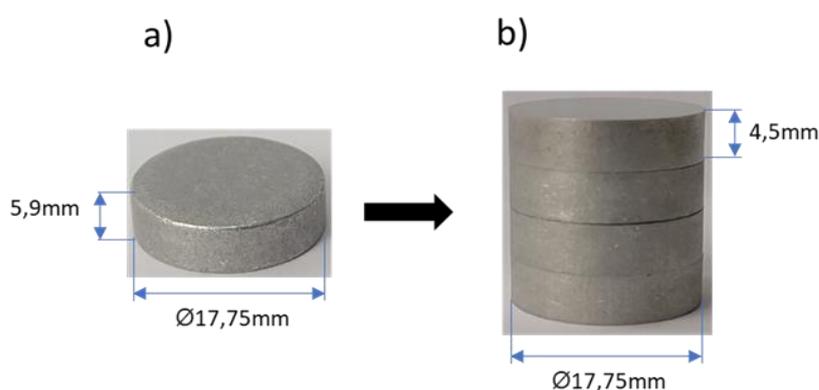
A metodologia desse trabalho segue os moldes da utilizada por Alves et. al. (2011) com algumas modificações e simplificações, entre elas pode-se citar a substituição do material utilizado nos ensaios experimentais e a redução no número de experimentos das diferentes quantidades de camada já que não estavam disponíveis um grande número de amostras.

Os dados do trabalho foram obtidos por meio de ensaio de compressão realizado em 6 corpos de prova (compostos de um empilhamento de 4 discos cada) em duas condições de lubrificação diferentes e simulação numérica por elementos finitos no *software Abaqus®*, os detalhes da metodologia estão descritos nos próximos tópicos.

3.1. CORPOS DE PROVA

A definição do corpo de prova se iniciou pela seleção da matéria prima, para a qual foi escolhida uma pastilha de alumínio utilizada na fabricação de canecas para capacitores, tal elemento é fornecido com diferentes alturas e diâmetros sendo necessário no primeiro momento realizar uma seleção dentro das possibilidades dos materiais disponíveis, de forma a ser possível obter os corpos de prova para o ensaio com a razão entre os valores proposto por Gunasekera et al. (1989). A pastilha selecionada é fabricada com a liga de alumínio AA 1070A-O, possui altura de 5,9 mm e um diâmetro de 17,75 mm conforme mostra a Figura 2. Nessa Figura é possível observar também que a matéria prima não possui as faces planas, isso ocorre devido ao seu processo de corte durante a sua produção. Para evitar problemas de alinhamento e não homogeneidade durante o ensaio de compressão, os corpos de provas foram usinados até um dimensional de $\text{Ø}17,75 \times 4,5$ mm.

Figura 2 - Dimensional das pastilhas de alumínio. a) Material como recebido; b) Corpo de prova final



Após a usinagem as faces dos foram polidas para reduzir a rugosidade na tentativa de reduzir a influência do atrito no decorrer do ensaio. Ao todo foram confeccionados 30 discos com o objetivo de obter 6 amostras com 4 discos cada.

3.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO

O fluxo do processo até a realização do ensaio de conformação pode ser visto na Figura 3 no qual está descrito por ordem cronológica as etapas até a execução do ensaio.

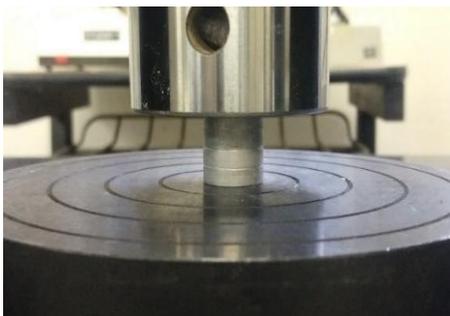
Figura 3 - Fluxo de processo do ensaio de conformação



O ensaio de compressão foi realizado com o auxílio do técnico laboratorista no laboratório do GMAP (Grupo de Mecânica Aplicada), localizado no Campus da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o equipamento utilizado foi uma máquina de ensaio universal modelo WDW 100E do fabricante *Shinjin TimeGroup®* com capacidade de 100 kN, as matrizes utilizadas foram as originais do equipamento dimensionadas para a capacidade de carga do equipamento, as configurações do ensaio como a velocidade de compressão e o ajuste do ponto inicial da compressão foram realizados no software do equipamento em um computador ligado a máquina, a aquisição dos dados dos ensaios também foram feitas através do programa, a força foi obtida pela célula de carga do equipamento com capacidade de 100 kN e resolução de 0,02 N, e o deslocamento, na falta de um extensômetro específico para compressão, foi obtido pelo transdutor do cabeçote do equipamento com resolução de 0,001 mm.

Os ensaios foram realizada com uma taxa de aquisição de 10 Hz, a uma velocidade de compressão de 50 mm/min (0,83 mm/s), as matrizes e a amostra foram limpas e suas superfícies devidamente lubrificadas, esse processo foi repetido para cada uma das amostra utilizadas, devido à dificuldade do alinhamento dos discos eles foram colados com fita na parte externa do diâmetro e então posicionados nos pratos de compressão após uma pré-carga de 0,8 N foi aplicada para manter o alinhamento dos discos e em seguida a fita foi então retirada e a pré-carga reduzida pra 0,2 N, um exemplo do posicionamento é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Montagem do CP-1 após a retirada da fita antes do início da compressão.

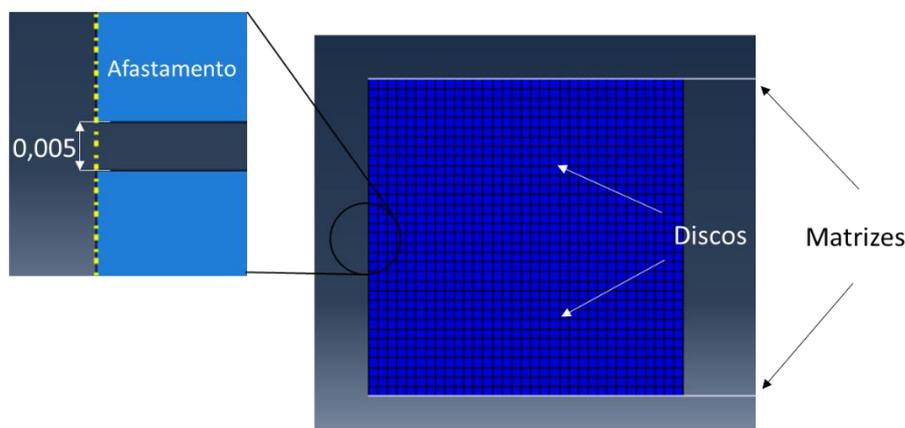


3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Os efeitos dinâmicos não foram considerados durante a simulação, considerando que o ensaio de compressão ocorreu sem mudança de temperatura e a taxa de deslocamento constante de 50 mm/min é pouco provável que os efeitos inerciais tenham influência significativa nos resultados obtidos. A simulação foi realizada no *software Abaqus®*, utilizando o modelo axissimétrico 2D, o elemento escolhido para a análise foi o CAX4R um elemento quadrilátero de 4 nós e de integração reduzida. Como os efeitos dinâmicos são pouco significativos para essa condição analisada, assim como Alves et al. (2011), utilizou-se também a solução explícita, mas reproduzindo o comportamento quase-estático, sendo necessário uma verificação dessa condição ao final da simulação, para isso utilizou-se a avaliação das energias cinéticas e internas a qual o corpo deformado foi submetido.

A modelagem do problema foi realizada conforme a Figura 5, na qual, as matrizes são formadas por elementos analíticos rígidos e o disco construindo com elemento axissimétrico 2D deformável. Como já comentado, a condição de simetria foi utilizada devido a geometria do modelo, dessa forma é possível reduzir o tempo computacional e obter um melhor aproveitamento dos elementos disponíveis na versão estudante do *software Abaqus®*, limitada à 1100 elementos. A avaliação ocorre em duas condições de montagem, a primeira com o cilindro sólido, e a segunda com dois discos empilhados, para a primeira condição o cilindro sólido foi representado por um retângulo com dimensão de 9x8,875 mm e no segundo caso os discos foram representados por retângulos com a metade da altura cilindro sólido. A quantidade de discos empilhados para o modelo conceitual se justifica a partir da análise de Alves et al. (2011) de que o comportamento do fluxo do material na região de contato entre os discos vizinhos será semelhante sendo possível que os resultados encontrados para essa condição sejam extrapolados para um modelo com mais camadas. Visando representar a condição de empilhamento dos discos, foi considerada uma possível folga de montagem 0,5 μm e imposta uma diferença de forma de 10 μm ao longo do diâmetro de forma a contemplar um desalinhamento na montagem ou diferença na fabricação dos copos de prova, essa condição promove uma diferença considerável nos resultados da simulação quando são comparados com a condição de contato com e sem atrito na região entres os discos.

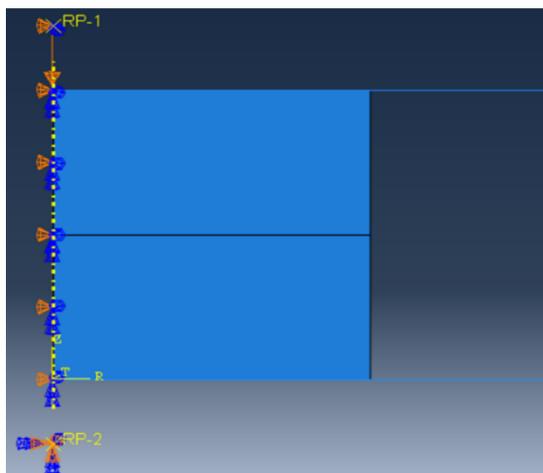
Figura 5 - Montagem dos componentes da simulação para o caso dos cilindros empilhados.



As condições de contorno do modelo são apresentadas na Figura 6, na qual, é possível observar além dos elementos já citados anteriormente, dois pontos de referência, esses pontos foram utilizados para aplicação das condições de contorno às matrizes. No ponto de referência (RP-1) localizado na matriz superior foi aplicada restrição de movimento e rotação na etapa

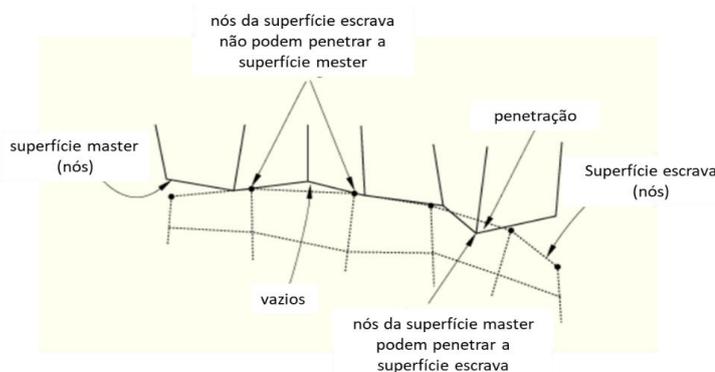
inicial de forma garantir o contato antes do deslocamento, e na segunda etapa foi então aplicado um deslocamento prescrito ao longo do eixo y visando obter 55% de redução da altura inicial e uma restrição de rotação e deslocamento em x , a matriz inferior recebeu a condição de engaste aplicada no ponto de referência (RP-2), essa condição atribuída na etapa inicial se manteve até a etapa final da simulação, a face lateral dos discos recebeu a condição de simetria restringindo as rotações e translação em x que assim como a condição atribuída à matriz inferior, se manteve em todas as etapas da análise. Durante a análise foi considerada a condição de não linearidade geométrica do software

Figura 6 - Representação das condições de contorno para a simulação, axissimetria 2D, deslocamento prescrito em RP-1 e engaste no RP-2.



A respeito das relações de entre os elementos do modelo pode-se descrever o comportamento do contato normal sendo do tipo “duro” ativado enquanto houve contato entre as superfícies e desativado quando separados. O contato tangencial foi descrito pelo modelo de atrito de Coulomb que utiliza a tensão de cisalhamento crítica, depende do coeficiente de atrito e da pressão de contato. Para determinar o início do escorregamento, em relação às restrições entre as faces utilizou o algoritmo cinético para descrever seu comportamento, essa formulação define uma das faces como sendo mestre e a outra como escrava, e as relações entre elas pode ser visualizada na Figura 7 retirada do manual do *Abaqus/Explicit*®.

Figura 7 - Esquema para demonstrar a penetração devido a uma discretização grosseira. Fonte: adaptado *Abaqus*® documentation version 6.6



O algoritmo cinético distribui as forças de resistência dos nós escravos aos nós da superfície mestre, assim como a massa de cada nó da superfície escrava em contato com a superfície

mestre também é distribuída, calculado a massa inercial em contato. O *ABAQUS/Explicit* utiliza essas informações para calcular a aceleração dos nós mestre, e corrige a aceleração dos nós escravos utilizando a penetração prevista de cada nó. Essa correção é então aplicada a superfície com as restrições citadas anteriormente. Quando a superfície mestre é formada por faces de elemento, as forças de contato da superfície mestre são distribuídas para os nós das faces mestras que estão sendo penetradas. Essa condição utilizada não foi a mesma do estudo de Alves et al. (2011) ela se justifica pela dificuldade em obter a convergência com o modelo de penalidade que possui a vantagem da redução do tempo computacional, com o aumento da rigidez das superfícies após um incremento, além disso para a condição do cilindro sólido com atrito foi utilizado o recurso de pequenos deslocamento que difere dos deslocamento finitos, por definir uma posição de ancoragem no nó mestre que garante que os nós escravos adjacentes permaneçam próximos após a deformação.

O modelo descrito acima, foi solucionado em um computador pessoal padrão, onde possível obter a solução com 1044 elementos em cerca de 5 minutos considerando o tempo para a solução do modelo mais demorado.

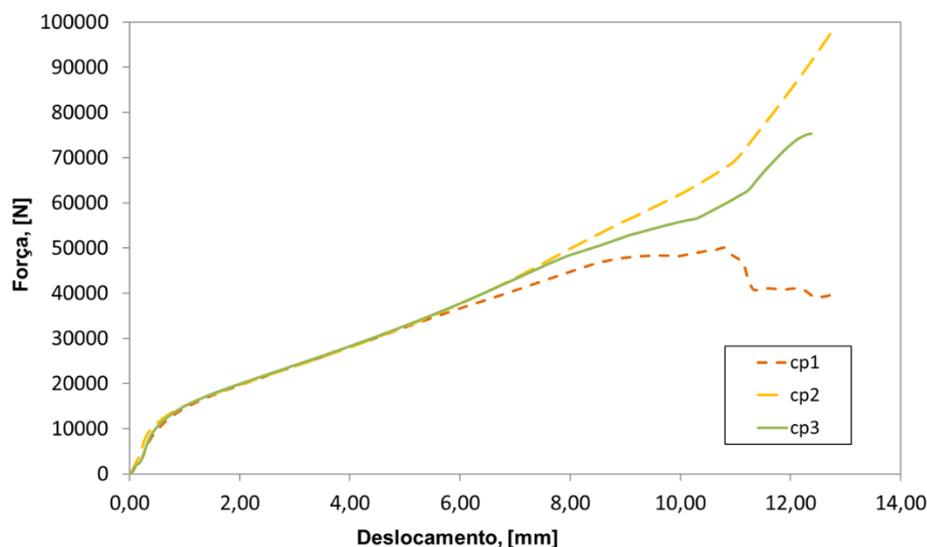
4. RESULTADOS

Nessa seção será mostrado o resultado das análises realizadas divididas em duas partes principais. A primeira parte está centrada no ensaio experimental utilizando os discos empilhados e a segunda na análise numérica computacional onde buscou-se verificar as diferenças do comportamento da amostra sólida para a amostra empilhada, assim como a influência do tipo de contato entre os discos.

4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

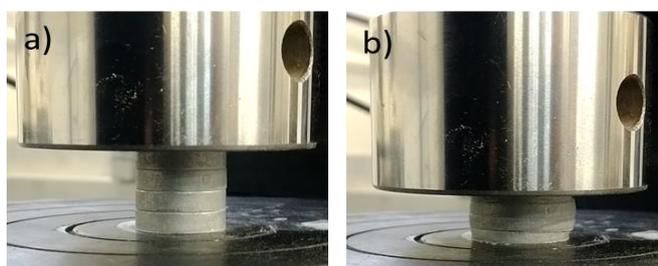
Os resultados encontrados nos ensaios experimentais podem ser verificados nos gráficos mostrados a seguir, a partir desse momento os corpos de prova serão tratados com “cp” onde os cp 1, 2 e 3 utilizaram estearato de zinco como lubrificante e os cp 4, 5 e 6 micro óleo.

Figura 8 - Comportamento da Força x Deslocamentos para os ensaios utilizando estearato de zinco como lubrificante.



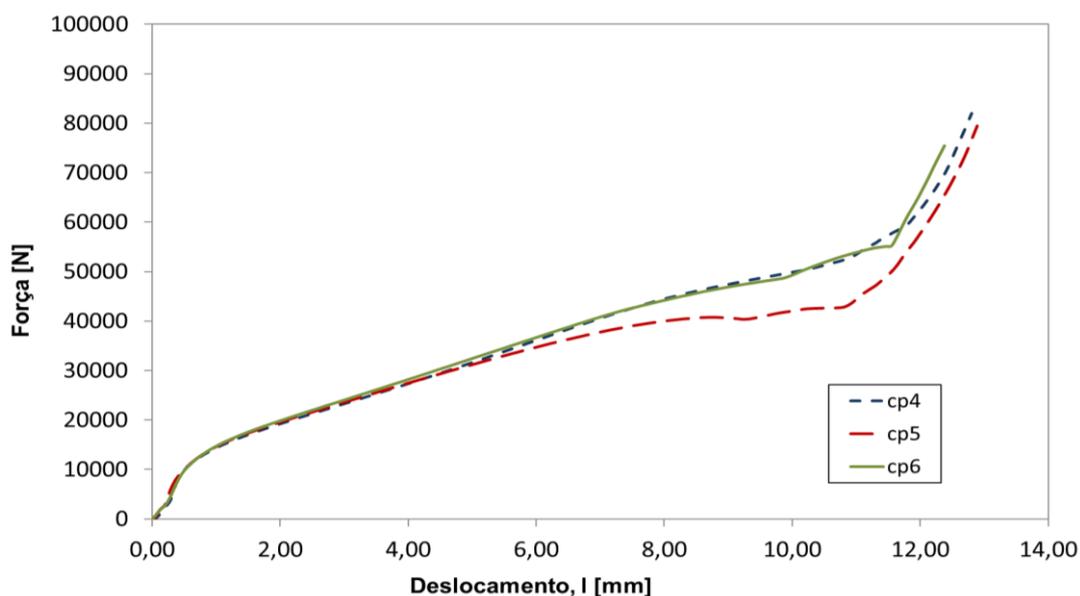
A partir da Figura 8 é possível verificar que os cp 1, 2 e 3 apresentaram comportamento semelhante na região inicial do deslocamento, sendo possível constatar que essa tendência não se manteve ao longo do ensaio. Buscando entender o motivo de tal diferença, os vídeos gravados ao longo da execução assim como as anotações realizada durante o experimento foram consultados, dessa forma foi possível verificar que cp-3 apresentou o comportamento mais semelhante ao ensaio de compressão uniforme, o cp-1 apresentou flambagem, o início do processo como mostra a Figura 9, explicando a queda da força ao longo do ensaio, tal como evidenciado por Gunasekera et al. (1989). Já o cp-2 apresentou uma condição não uniforme de deformação onde a cilindricidade não se manteve após o início da deformação, no entanto o aumento da força nessa condição não tem uma razão clara a qual possa se fazer inferência, é possível que a matéria prima apresente anisotropia, que o lubrificante não estivesse atuando uniformemente na superfície de contato, ou até mesmo uma possível mistura durante a fabricação o que poderia explicar essa diferença observada.

Figura 9 - Imagens do ensaio para o cp-1: a) antes da compressão e b) após início da flambagem.



Os valores obtidos durante o ensaio dos cp 4, 5 e 6, que utilizaram óleo como lubrificante, estão apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Comportamento da Força x Deslocamento para os ensaios que utilizaram óleo como lubrificante.

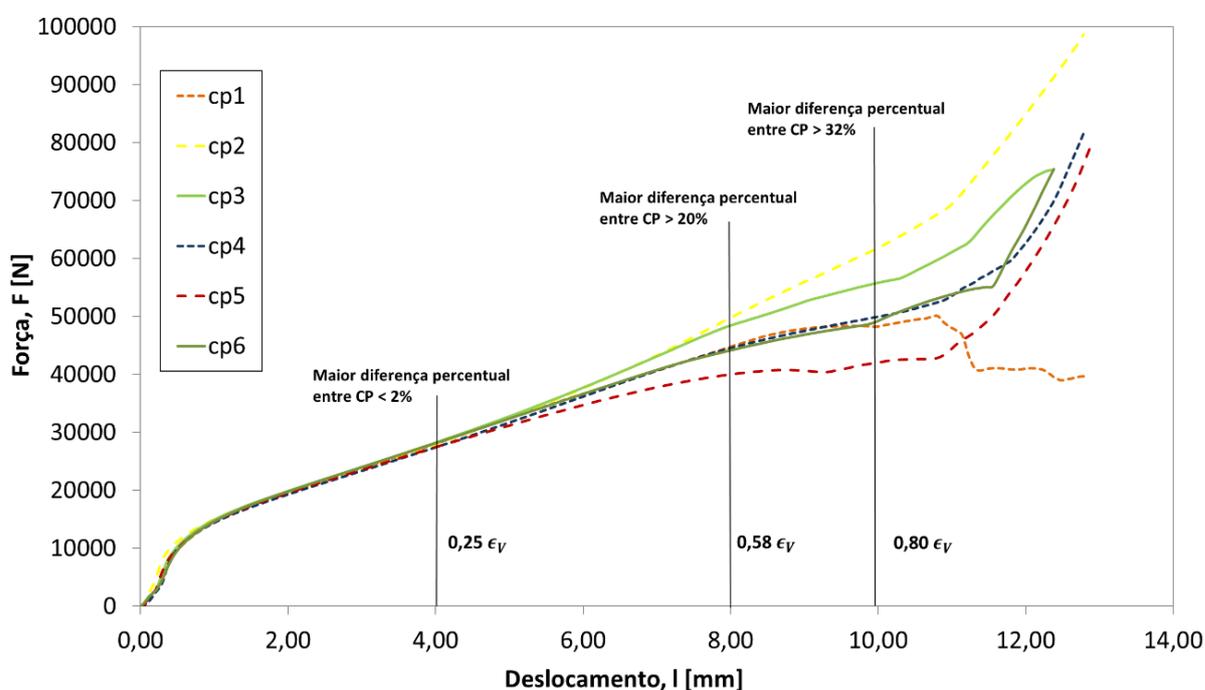


A partir da análise da Figura 10 é possível verificar que o comportamento para essa condição de lubrificação apresentou uma melhor repetibilidade entres os cp's ensaiados, quando comparados a condição vista anteriormente. O procedimento de consulta às anotações e dos vídeos dos ensaios também foram utilizados para melhor compreensão do comportamento das

amostras lubrificadas com micro óleo. Verificou-se que os cp 4 e 6 apresentaram comportamento semelhante ao longo de quase todo o ensaio exceto na da parte final, onde os discos interno se partiram aumentando drasticamente a aérea do corpo de prova provocando a mudança na inclinação da curva de força, o cp-5 apresentou escorregamento entre os discos provavelmente devido a uma condição não homogeneidade de contato entre os discos, o que explica o descolamento da curva em relação às outras amostras.

Conforme observou-se, os ensaios experimentais na primeira condição de lubrificação não tiveram repetibilidade, no entanto não foi possível atribuir esse comportamento ao tipo do lubrificante. De maneira geral essas diferenças nos valores encontrados indicam uma relação com a fabricação dos discos.

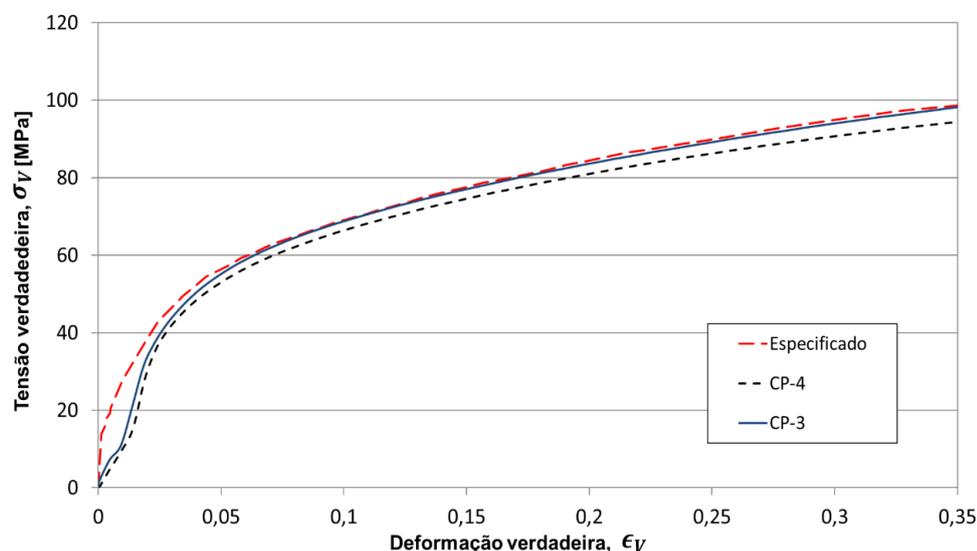
Figura 11 - Comportamento da Força x Deslocamento para os ensaios com avaliação da diferença percentual da força em função da deformação verdadeira.



A Figura 11 mostra a relação do percentual de deformação verdadeira com as diferenças percentuais das forças encontradas para cada amostra ensaiada, dessa forma é possível observar que os valores apresentados na faixa de 25% de deformação são menores que 2% mostrando uniformidade mesmo para as amostras que apresentaram um comportamento irregular, dessa forma para as etapas posteriores essa premissa será utilizada para caracterizar a região de plasticidade do material, como dados de entrada para o modelo numérico.

Os valores apresentados na Figura 12 consideram as observações anteriores, dessa forma são apresentadas as curvas de escoamento dos cp com melhor comportamento para cara uma das condições de lubrificação para fins comparativos com os valores especificados pelo fornecedor para o material em análise.

Figura 12 - Comportamento das curvas de escoamento do material como recebido e dos valores experimentais para as melhores condições de ensaio

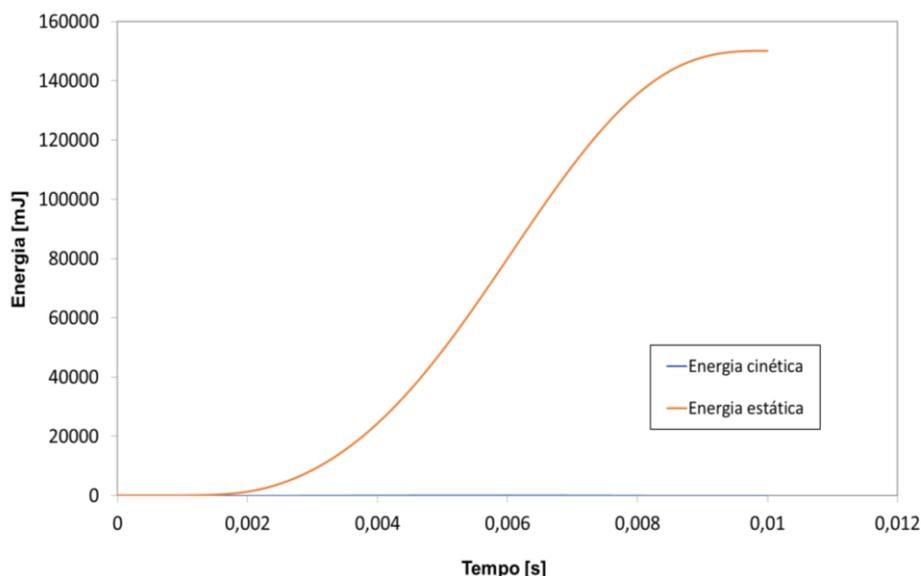


A observação das curvas permite verificar que os valores para o cp-3 é bem similar a curva do material como recebido. É possível identificar também quem os valores para o cp-4 apresentaram uma redução na tensão quando comparado às outras curvas, além disso outro comportamento pode ser percebido, a distância entre os valores iniciais entre as curvas experimentais e a os valores especificados uma possível explicação é a maneira como os deslocamento foram obtidos, uma vez que durante a análise os valores considerados foram a partir do deslocamento do cabeçote do equipamento, podendo apresentar a influência das folgas do sistema, assim como a deformações elásticas dos demais componentes da máquina.

Ao longo do trabalho não foi possível realizar o ensaio de compressão convencional com cilindro sólido justamente pela dificuldade de obter o material nessa condição, por tanto, os valores utilizados para caracterizar a região plástica do material na etapa da simulação foram retirados da curva cp-3 que foi a condição que mais se assemelhou a curva disponibilizada pelo fornecedor (curva “especificado”) que é referência mais próxima para o comportamento do material.

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os resultados apresentados a seguir foram analisados com a premissa de um modelo quase-estático conforme sugeriu Alves et al. (2011), utilizando a formulação explícita com um tempo de 0,01 s. Para validar o modelo nas condições sugeridas para solução foi realizada uma análise das energias cinética e estática, conforme mostra a Figura 13.

Figura 13 - Comportamento das energias cinética e estática no corpo deformado com $t=0.01$ s

Outro ponto importante a ser comentado aqui é que o modelo constitutivo usado para modelar a parte elástica e plástica do material não depende da taxa de deformação, onde a elasticidade do material é modelada como linear e isotrópica e o endurecimento associado ao modelo de plasticidade é isotrópico utilizando o critério de escoamento de von Mises. Para obter a caracterização do material utilizou-se o recurso de calibração disponibilizado pelo *software*, com os valores encontrados de tensão x deformação verdadeira do CP-3, uma figura representando o método de obtenção é apresentada no APÊNDICE-A.

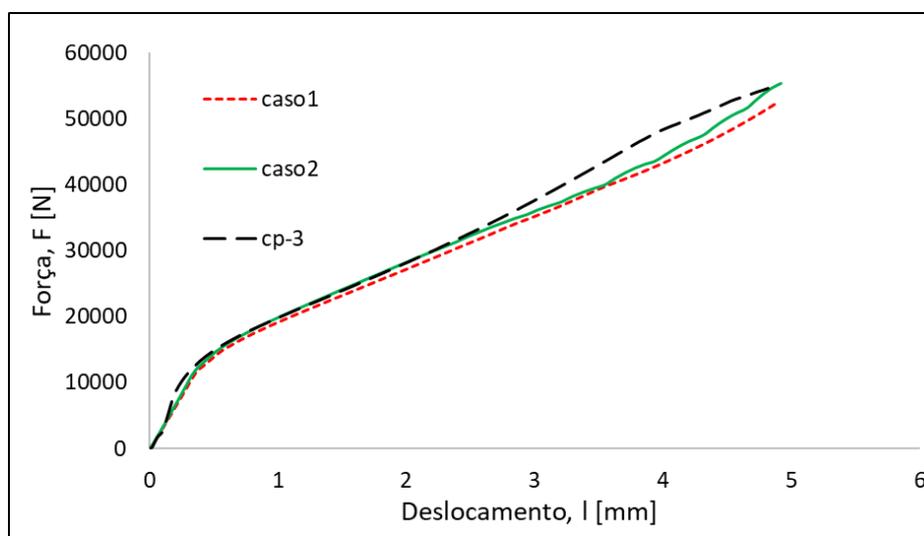
Ao todo foram avaliadas 7 condições variando os tipos de contato e montagem, os detalhes estão apresentados na Figura 14 abaixo, na qual m_f diz respeito ao valor do atrito para as faces dos discos e cilindros com a matriz, e m_d o valor de atrito entres os discos.

Figura 14 - Detalhe das condições de montagem e contato para cada um dos casos simulados.

Condição	Tipo da amostra	Contato com a matriz	Contato entre discos
Caso 1	Cilindro sólido	Sem atrito	N/A
Caso 2	Cilindro sólido	Com atrito $m_f=0,1$	N/A
Caso 3	Cilindro sólido	Com atrito $m_f=0,1$ em uma das faces	N/A
Caso 4	2 cilindros	Sem atrito	Sem deslizamento
Caso 5	2 cilindros	Sem atrito	Com atrito $m_d=0,2$
Caso 6	2 cilindros	Com atrito $m_f=0,1$ em uma das faces	Sem deslizamento
Caso 7	2 cilindros	Com atrito $m_f=0,1$ em uma das faces	Com atrito $m_d=0,2$

A primeira análise foi a comparação dos valores de força em função do deslocamento para os cilindros sólidos, caso 1 e 2, que consideram a simetria em xz para comparação em relação ao valor experimental, conforme mostra a Figura 15.

Figura 15 - Valores de força x deslocamento dos casos 1 e 2 em comparação ao valor experimental do cp-3

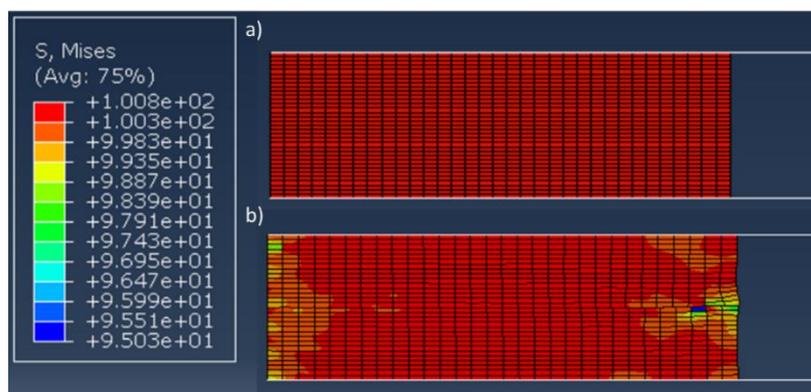


É possível verificar que os valores encontrados na simulação demonstraram o mesmo comportamento do ensaio experimental, é possível observar também que a condição com atrito $m_f=0,1$ (caso2) se aproximou dos valores encontrados para o cp-3, esse valor de atrito selecionado foi baseado nos estudos realizado por Geiger (2007) para a condição de lubrificação de estearato de zinco em alumínio.

As análises do comportamento dos discos empilhados foram direcionadas à região de contato entre eles, verificando o seu comportamento em relação a um possível desalinhamento na montagem, e as condições de contato descritas na Figura 14, para análise do caso 5 utilizou-se $m_d=0,2$, valor verificado por Sequeira (2017), como limite para que ocorra o escorregamento entre anéis empilhados durante a compressão.

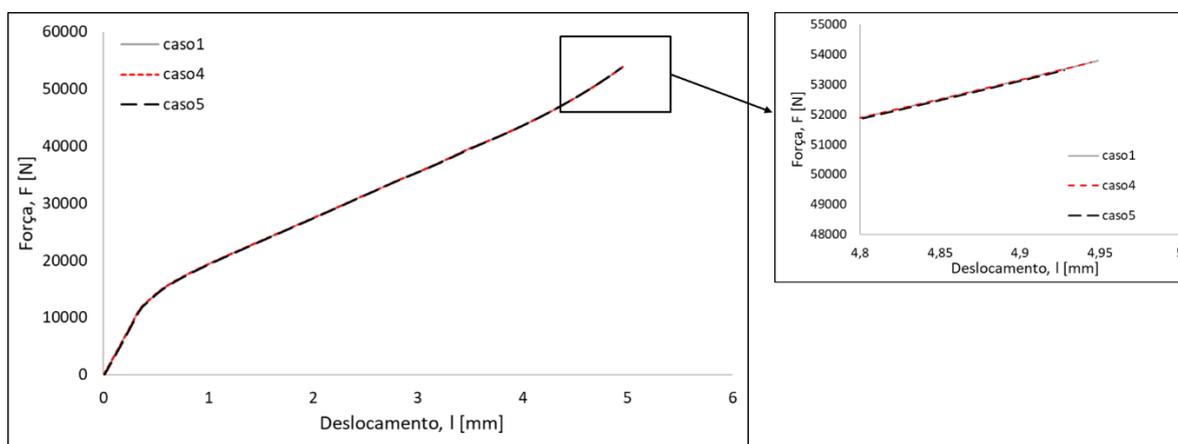
Os resultados obtidos na simulação estão apresentados na Figura 16, na qual é fica evidenciada a não homogeneidade das tensões devido ao desalinhamento em conjunto com o deslizamento entre as faces.

Figura 16 - Comportamento da distribuição da tensão para as diferentes condições de contato
a) contato não deslizante caso 4; b) contato com atrito $m_d=0,2$ caso 5.



A Figura 17 compara os valores de força e deslocamento obtidos com o cilindro sólido com os obtidos para as diferentes condições de contato para os cilindros empilhados, é possível verificar que os valores são praticamente idênticos, corroborando com os valores encontrados por Alves et al. (2011).

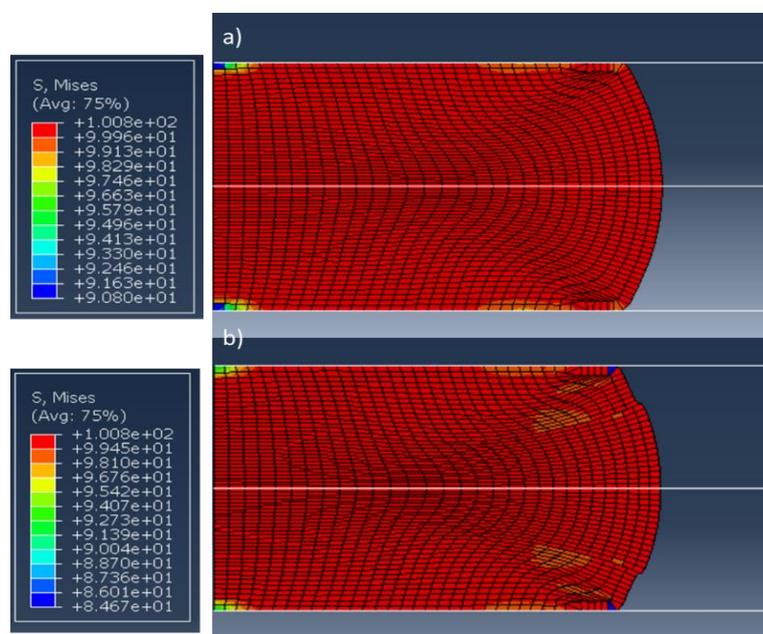
Figura 17 - Comparação de força x deslocamento do cilindro sólido em comparação com os diferentes contatos entre as faces dos cilindros empilhados.



É possível verificar também que o desalinhamento inicial em conjunto com o deslizamento gera uma condição de não homogeneidade, no entanto essa condição não é suficiente para alterar o comportamento da curva de força-deslocamento.

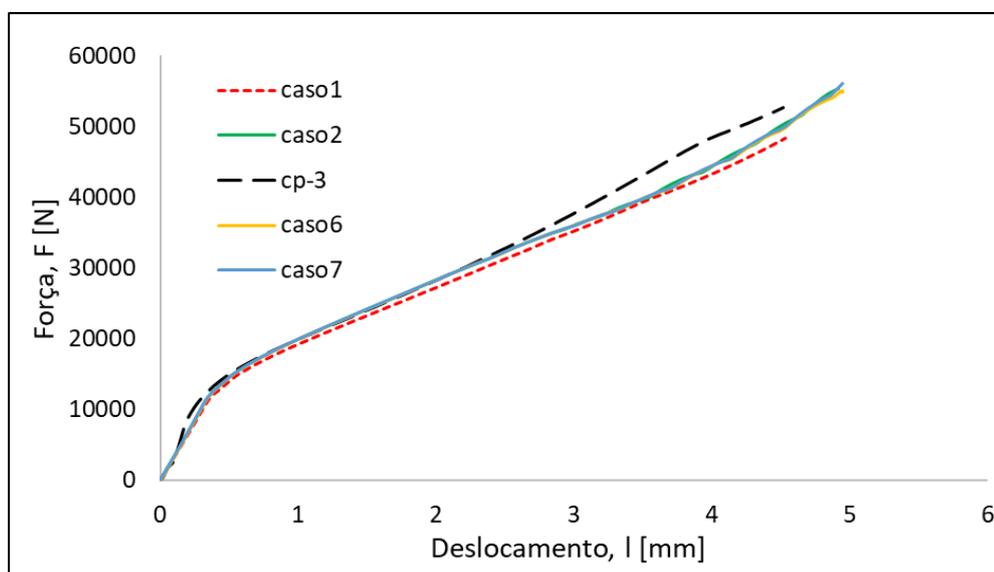
Por último foram analisadas as condições de simetria em xz com o propósito de validar a hipótese de Alves et al. (2011) que o comportamento da vizinhança dos discos será semelhante podendo essa avaliação conceitual com dois discos ser extrapolada para uma condição com mais camadas, os valores encontrados da tentativa de reproduzir essa condição são apresentados na Figura 18.

Figura 18- Distribuição das tensões após a compressão casos com simetria xz ; a) valores de tensão para o caso 6; b) valores de tensão para o caso 7



Assim, como verificado nas condições simplificadas com dois discos é possível verificar que quando há deslizamento as tensões tendem a ser menos uniformes, os valores de força estão apresentados na Figura 19 abaixo, e serão comparados com o valor experimental do cp-3 e as condições de simetria do cilindro sólidos caso 1 e 2.

Figura 19 - Comparação da condição numérica com simetria xz , experimental e numérica sem simetria zx .



É possível observar que os valores para curvas com e sem escorregamento casos 6 e 7, são praticamente idênticos, conforme esperado a partir das análises com dois discos, é possível verificar também que os valores para o cilindro sólido submetido à mesma condição de atrito no contato com a matriz (caso2), são praticamente iguais aos valores encontrados para os casos experimental curva cp-3, assim como para os casos 6 e 7, reforçando a validade do ensaio.

5. CONCLUSÃO

A análise dos resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho, permite afirmar que os teste dos discos empilhados pode ser utilizado para obtenção das curvas de escoamento para materiais fornecidos em formato de disco ou chapa. Os ensaios experimentais exigem cuidado principalmente na fabricação dos corpos de prova, a qualidade da fabricação influencia diretamente na confiabilidade dos valores para deformações maiores que 30%. As simulações numéricas, verificaram que o comportamento da força versus deslocamento é praticamente idêntico, mesmo na presença de pequenos desalinhamentos que promovem uma não homogeneidade das tensões após a deformação. Os valores encontrados na simulação foram muito semelhantes os valores experimentais dentro da região confiável de deformação.

É necessária uma análise mais detalhada das amostras antes de serem submetidas ao ensaio, uma vez que durante a simulação os valores de força versus deslocamento não foram sensíveis ao nível de desalinhamento aplicado. Necessita-se também da verificação da curva da matéria prima com corpo de prova sólido, para uma melhor confiabilidade nos resultados obtidos, uma vez que a única referência ainda são os valores fornecidos pelo próprio fornecedor do material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaqus *online documentantation* v6.6: *Version 2020* Disponível em: <<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usb/default.htm?startat=pt06ch22s02alm02.html#usb-elm-einfinite>> - Acesso em: 25 fevereiro, 2022

Alves, A. P; “**Projeto de capacitores eletrolíticos de alumínio para aplicações industriais**”, Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Departamento de Engenharia Elétrica. Porto Alegre, pp 11, 2019.

Alves, L.M., Nielsen, C. V., Martins, P. A. F. (2011) “**Revisiting the Fundamentals and Capabilities of the Stack Compression Test**”, *Experimental Mechanics*, 51(9), pp. 1565-1572. Doi 10.1007/s11340-011-9480-5

ASTM Standard E9-09 (1995) “**Standard test methods of compression testing of metallic materials at room temperature**”. ASTM International, West Conshohocken

Faria, P. V; “**Influência dos parâmetros na soldagem por resistência elétrica de chapas de aço revestidas com cobre, níquel e ouro em alumínio**”, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEM. Porto Alegre, pp 14, 2012.

Geiger, M; “**Considerações sobre Atrito para Processo de Forjamento a Frio através do Ensaio de Compressão do Anel**”, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEM. Porto Alegre, pp 63, 2007

Gunasekera, J. Chitty, E. Kiridena, V. “**Analytical and physical modelling of the buckling behaviour of high aspect ratio billets.**” Department of Mechanical Engineering. Ohio University, Athes, 1989.

Hatwig. A. R; “**Aplicação de tratamentos isotérmicos para adequação microestrutural do aço inoxidável superduplex UNS-S32760 visando conformação a frio**” Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEM. Porto Algre, 2015

Hochholdinger, B. Grass, H. Lipp. A. Hora, P. “**Determination of flow curves by stack compression tests and inverse analysis for the simulation of hot forming.**” 7th European LS-DYNA Conference, Salzburg, Austria, 2009

Pawelski O (1967) “**Über das stauchen von holzylindern und seine eignung zur bestimmung der formänderungsfestigkeit dünner bleche**“. *Arch Eisenhüttenwes* 38:437–442

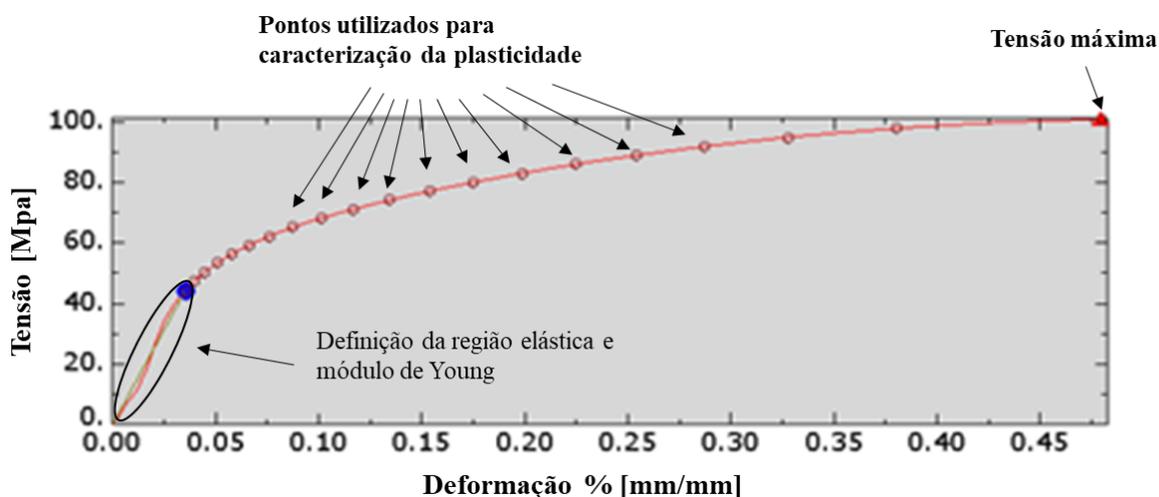
Sequeira, R, J. “**Avaliação Tribológica Através de Ensaio de Anéis Empilhados**”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade de Lisboa – Instituto Técnico Superior. Lisboa, 2017

TDK Electronics 2019. “**Aluminum Electrolytic Capacitors**”, dec. 2019. Disponível em: <<https://www.tdk-electronics.tdk.com/en/529310/products/product-catalog/aluminum-electrolytic-capacitors/axial-lead-soldering-star-capacitors.>> Acesso em: 25 fevereiro, 2022.

APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO E ELASTOPLÁSTICO DO MATERIAL

A figura abaixo mostra de forma resumida o uso do assistente para calibração de curvas para caracterização do comportamento elástico e elastoplástico do material no *software Abaqus*®. Os dados apresentados na curva são os valores de tensão-deformação verdadeira para o CP3, ver Figura 20.

Figura 20 - Exemplo da utilização do recurso de calibração de curvas para caracterização do comportamento elástico e elastoplástico do material no *software Abaqus*®. Fonte: *software Abaqus Student*®



É possível utilizar os valores de tensão-deformação de engenharia e realizar a transformação para os valores de tensão-deformação verdadeira no próprio *software* ou o usuário pode utilizar diretamente os valores de tensão-deformação verdadeira. De posse da curva de tensão-deformação verdadeira a obtenção dos dados se inicia pela definição da reta que caracteriza a região elástica do material, com esses dados são obtidos os valores do módulo de Young e a tensão de escoamento. O próximo passo é a definição do limite de resistência ou tensão máxima dependendo do formato da curva resultante obtida após a transformação, posteriormente é necessário definir quantos pontos serão utilizados para descrever o endurecimento na região de plasticidade, após definidos os valores correspondentes de tensão e deformação precisam ser exportados para o material previamente criado no modelo.

Após a exportação, deve ser realizada a verificação dos valores, uma atenção especial deve ser atribuída aos valores que definem o comportamento durante a plasticidade, os valores de deformação devem iniciar em zero desconsiderando o valor da deformação elástica e todos os valores de tensão-deformação devem apresentar crescimento, caso seja identificada alguma queda de tensão é necessário remover esses pontos manualmente.