

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Análise Numérica de Forjamento a Quente de Aço Ferramenta Encapsulado em
Aço Carbono

por

Eduardo Paixão Ritter

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, junho de 2019



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

Análise Numérica de Forjamento a Quente de Aço Ferramenta Encapsulado em
Aço Carbono

por

Eduardo Paixão Ritter

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
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Felipe Tempel Stumpf

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Edson Hikaro Aseka

Porto Alegre, 08 de julho de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial ao meu pai Ronaldo, à minha mãe Leni e ao meu irmão Guilherme, por sempre estarem comigo nessa jornada.

Agradeço aos meus amigos e colegas pela amizade e companheirismo.

Agradeço ao LET da Universidade do Oeste da Boêmia pelo apoio e pela ajuda importantíssima na realização desse trabalho.

RITTER, E. P. **Análise Numérica De Forjamento A Quente De Aço Ferramenta Encapsulado Em Aço Carbono**. 2019, 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O processamento semissólido de materiais permite a fabricação de peças com geometrias complexas e com menores forças de conformação, porém a sua aplicação em aços ainda é limitada por dificuldades técnicas. O seu uso no aço ferramenta X210Cr12 pode produzir uma microestrutura livre de carbeto de cromo precipitados, resultando em maior resistência a esforços cíclicos. Para entender o comportamento de uma amostra cilíndrica de X210Cr12 envolta em aço S235JR em compressão a quente, foi realizada uma análise utilizando o Método dos Elementos Finitos com o *software* ANSYS. Ensaio de tração foram utilizados para determinar as curvas de escoamento utilizadas na simulação. Foi realizado um experimento, e a peça deformada foi utilizada para comparação com os resultados numéricos. Verificou-se que o ANSYS conseguiu simular o processo, porém apresentou problemas na definição da curva de escoamento e para obter as dimensões deformadas com precisão.

PALAVRAS-CHAVE: método dos elementos finitos, compressão de cilindro, trabalho a quente, plasticidade

RITTER, E. P. **Numerical Analysis Of Hot Forging Of Tool Steel Encased In Carbon Steel.** 2019, 25. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

The semi-solid processing of materials allows for production of components with complex geometries with lower forming forces, but its application in steels is still limited due to technical difficulties. Semi-solid processing of X210Cr12 tool steel can produce a microstructure free of precipitated chromium carbides, resulting in higher resistance to cyclic stresses. In order to understand the behaviour of a cylindrical sample of X210Cr12 steel encased in a S235JR shell during hot compression, an analysis with the Finite Element Method was done using ANSYS software. Tensile tests were done to determine the flow stress curves used in the simulation. An experiment was undertaken and the deformed sample was used to compare with the numerical results. It was found that ANSYS was able to simulate the process, but had issues in the definition of the flow stress curves and to obtain the deformed geometry's dimensions with precision.

KEYWORDS: finite element method, cylinder compression, hot working, plasticity.

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. OBJETIVOS	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
4.1. Compressão Axial de um Cilindro	2
4.2. Modelos de Atrito	3
4.3. Modelos de Plasticidade	3
4.1. Determinação das Curvas de Escoamento	4
5. METODOLOGIA	5
5.1. Ensaios de Tração	5
5.2. Modelos Analíticos	6
5.3. Procedimento Experimental de Conformação	7
5.4. Simulação no ANSYS	7
5.4.1. Modelagem e Configuração do Problema	7
5.4.2. Malha	9
5.4.3. Simulação Estática e Dinâmica	9
5.5. Análise dos Resultados	9
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
6.1. Estudo de Convergência de Malha	9
6.2. Simulação Estática e Dinâmica	10
6.3. Resultados	11
6.3.1. Geometria Deformada Experimental e Numérica	11
6.3.2. Força de Compressão	12
6.3.3. Campos de Tensões e Deformações	13
7. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Anexo I	16
Anexo II	17
Apêndice A	18
Apêndice B	19

1. INTRODUÇÃO

O processamento semissólido de materiais começou a ser pesquisado em 1972 quando foi identificada a tixotropia (viscosidade dependente da taxa de deformação cisalhante) em uma liga de estanho e chumbo parcialmente fundida, e consiste em processar o material na condição de parcialmente fundido. O processamento semissólido é aplicado em peças fabricadas em alumínio e magnésio devido à possibilidade de se produzir produtos com geometria complexa em uma única etapa de conformação com forças relativamente baixas, entre outros motivos. A aplicação do processamento semissólido em aços é ainda limitada pois exige maiores temperaturas nas peças e um melhor controle de temperatura.

O aço X210Cr12 (2,10% C, 12% Cr) é um aço ferramenta de composição química semelhante ao AISI D3 e é utilizado na fabricação de matrizes de corte, punções, extrusão e outros processos de conformação. Peças fabricadas utilizando o aço X210Cr12 por processos tradicionais apresentam em carbetos de cromo pontiagudos, que prejudicam a resistência a esforços cíclicos. Conforme observado por Jirková et al., 2018, o processamento semissólido desse material pode resultar em uma microestrutura livre de carbetos de cromo precipitados, melhorando a resistência a esse tipo de esforços. Najafi et al., 2017, estudou os efeitos do trabalho a quente em amostras de aço AISI D3, discutindo os efeitos de fenômenos como a Recuperação Dinâmica e a Recristalização Dinâmica na evolução da microestrutura ao longo de ensaios de compressão. Esses fenômenos ocorrem ao longo do trabalho a quente e exigem uma determinada energia de ativação para iniciarem, sendo essa suprida pela temperatura e deformação plástica no material.

O presente trabalho visa simular numericamente a primeira etapa de conformação do processamento descrito por Jirková et al., 2018, porém em uma amostra de dimensões maiores. No procedimento de Jirková et al., 2018, uma amostra composta por um cilindro de aço X210Cr12 envolto por uma casca de aço S235JR (0,17% C, 1,40% Mn) foi tratada termicamente através de um aquecimento até 1240°C, imersa em óleo por alguns segundos para reduzir a temperatura até aproximadamente 1000°C e depois aquecida até 1080°C para depois ser forjada. A peça resultante desse processo apresentou microestrutura sem carbetos de cromo primários precipitados que prejudicassem a resistência a esforços cíclicos.

Em parceria com o Laboratório de Conformação Experimental (LET, do tcheco *Laboratoř Experimentálního Tváření*), no *Regional Technological Institute* (RTI), localizado na Universidade do Oeste da Boêmia, na República Tcheca, foi realizada a análise numérica da primeira etapa do forjamento realizado (compressão axial), com o objetivo de se desenvolver um processo que resulte em uma microestrutura similar à encontrada por Jirková et al., 2018 – sem carbetos de cromo pontiagudos.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise através do MEF da compressão axial a quente de um cilindro de aço X210Cr12 envolto em uma casca de aço S235JR para determinar o campo de deformações na peça. Será feita a determinação das curvas de escoamento dos dois materiais para uso na simulação. Para validar os resultados obtidos numericamente será realizado um teste experimental, e a geometria da amostra será comparada com os resultados numéricos. Os resultados desse trabalho serão utilizados para analisar as funcionalidades do *software* ANSYS em relação a esse tipo de problema, para ser posteriormente utilizado em casos mais complexos pelo RTI.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Kaur et al., 2014, analisaram mais de 50 trabalhos publicados tratando do Método de Elementos Finitos (MEF) aplicado a forjamento nos últimos 15 anos e verificaram que esse tipo de análise já possui maturidade e é aplicado com diversos objetivos, entre eles a previsão de defeitos e otimização de processos. Chenot et al., 2014, discutem novos desenvolvimentos

na área de simulação de forjamento, e apontam o crescimento do interesse em analisar o desenvolvimento da microestrutura ao longo do processo da deformação, além do aumento na complexidade dos problemas em estudo, incluindo o acoplamento térmico e metalúrgico, em função da disponibilidade de computadores mais poderosos.

Snape et al., 2002, realizaram uma análise da sensibilidade a variações de parâmetros em simulações numéricas de forjamento a quente considerando a transferência de calor entre a ferramenta e o ambiente para três casos de conformação. Foi encontrado que não há parâmetro mais sensível geral, e que cada processo possui sensibilidades diferentes. Em particular, para o caso em estudo, de compressão axial de um cilindro, os termos dominantes foram a tensão de escoamento inicial, o termo de temperatura na curva de escoamento para o trabalho de forja, a carga máxima de forjamento e o coeficiente de atrito para a deformação máxima. Polozine, 2007, realizou um estudo semelhante para a conformação de uma ponta de eixo e encontrou que o resultado mais sensível é a temperatura, e o parâmetro mais influente é a curva de escoamento.

Bennet, 2013, comparou diferentes modelos de material com resultados experimentais em um ensaio de forjamento e indicou possíveis vantagens e limitações para os modelos estudados. Foram avaliadas a carga de forjamento, energia de deformação e parâmetros microestruturais como tamanho de grão.

Kajtoch, 2007, descreveu a distribuição de deformações na compressão de cilindros e a influência de parâmetros como temperatura e taxa de deformação na mesma. Lin et al., 2008, estudaram os campos de tensão e de deformação na compressão a quente de um cilindro de 42CrMo, e o efeito de parâmetros como temperatura, taxa de deformação e a evolução microestrutural ao longo do processo.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Compressão Axial de um Cilindro

A compressão axial de um cilindro é um dos exemplos mais simples de forjamento em matriz aberta. É um processo para o qual existe solução analítica para tensões, deformações e forças envolvidas, e é muito dependente do atrito entre a peça e a ferramenta. Um coeficiente de atrito elevado pode provocar o fenômeno chamado embarrilamento, caracterizado por uma deformação radial não uniforme na peça, sendo ela maior no centro e menor na interface entre a ferramenta e a peça. Conforme Schaeffer, 2006, o esforço de compressão é descrito por

$$F = 2\pi k_f \left(\frac{h^2}{4\mu^2} \exp\left(\frac{2\mu r_0}{h}\right) - \frac{r_0 h}{2\mu} - \frac{h^2}{4\mu^2} \right) \quad (4.1)$$

onde F é a força de compressão [N], k_f é a tensão de escoamento do material [N/m²], h é a altura instantânea da peça [m], μ é o coeficiente de atrito entre a peça e a ferramenta, r_0 é o raio inicial da peça [m].

A deformação verdadeira e a taxa de deformação do material durante o processo são dadas por

$$\epsilon = \ln \frac{h_0}{h} \quad (4.2)$$

$$\dot{\epsilon} = \ln \frac{V_f}{h} \quad (4.3)$$

onde ϵ é a deformação real [m/m], h_0 e h são a altura inicial e instantânea [m], respectivamente, $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação [s⁻¹] e V_f é a velocidade da ferramenta [m/s].

4.2. Modelos de Atrito

Conforme Altan et al., 2004, são utilizados principalmente dois modelos de atrito para descrever processos de conformação mecânica. O modelo mais simples e mais difundido para uso geral é o Modelo de Coulomb, que descreve o cisalhamento na interface através do produto entre um coeficiente de atrito e a tensão normal, conforme

$$\tau = \sigma_n \mu \quad (4.4)$$

onde τ é a tensão cisalhante [N/m²], σ_n é a tensão normal [N/m²] e μ é o coeficiente de atrito de Coulomb.

Percebe-se que quando a tensão normal, devido à pressão da ferramenta sobre a peça, é muito alta, a tensão cisalhante pode superar a resistência ao cisalhamento do material e provocar o cisalhamento, resultando em uma situação que não descreve a realidade. Para solucionar esse problema, foi desenvolvido o Modelo Híbrido, também chamado de Modelo de Coulomb-Tresca, descrito por

$$\tau = \begin{cases} \mu\sigma_n & \mu\sigma_n < mk \\ mk & \mu\sigma_n \geq mk \end{cases} \quad (4.5)$$

onde m é o coeficiente de atrito de Tresca e k é a resistência do material ao cisalhamento [N/m²].

O Modelo Híbrido é aplicável caso a pressão aplicada seja muito alta, como é no caso de processos de forjamento. Altan et al., 2004, e Schaeffer, 2004 citam alguns valores típicos para o coeficiente de atrito de Tresca, enquanto Zhang e Ou, 2016 descrevem a relação entre os coeficientes de atrito de Coulomb e de Tresca e sugerem alguns valores para uso geral. O ANSYS utiliza por padrão a formulação de Coulomb.

4.3. Modelos de Plasticidade

O ANSYS suporta diversos modelos de material para descrever a plasticidade de estruturas. Para um caso de simulação de conformação a quente, se destacam os de encruamento isotrópico e os modelos viscoplásticos.

Os modelos de encruamento isotrópicos (bilinear e multilinear), são formulados de maneira simples, sendo definidos por duas ou mais retas, respectivamente. Ambos iniciam no regime elástico e sua curva tensão-deformação antes de atingirem a plastificação é simplesmente definida pelo módulo de elasticidade do material. Uma vez que é atingida a tensão de escoamento, a inclinação é alterada e o material deforma plasticamente com uma nova rigidez. No modelo de encruamento bilinear, o comportamento mecânico em regime plástico é definido pelo chamado módulo tangente, análogo do módulo de elasticidade do regime linear. Caso o módulo tangente seja nulo, tem-se o caso perfeitamente plástico. No caso do modelo de encruamento multilinear, são definidos diversos pontos através da sua tensão e deformação e o *software* fará a interpolação linear entre eles. Em todos os casos não existe tensão máxima. Ademais, devido ao método de solução empregado pelo ANSYS (Newton-Raphson modificado), não é possível inserir propriedades de material de forma que a inclinação da curva seja negativa. A Figura 4.1 ilustra as curvas tensão-deformação para os modelos de encruamento isotrópico bilinear e multilinear.

Dois modelos de viscoplasticidade disponíveis no ANSYS são o Modelo de Perzyna e Modelo de Peirce. Ambos possuem formulação semelhante, produzindo uma taxa de deformação plástica em função de alguns coeficientes dependentes do material, a qual é integrada e somada à deformação estática. As equações para os modelos de Perzyna e de Peirce, respectivamente, são

$$\dot{\epsilon} = \gamma \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^{\frac{1}{m}} \quad (4.6)$$

$$\dot{\epsilon} = \gamma \left[\left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right] \quad (4.7)$$

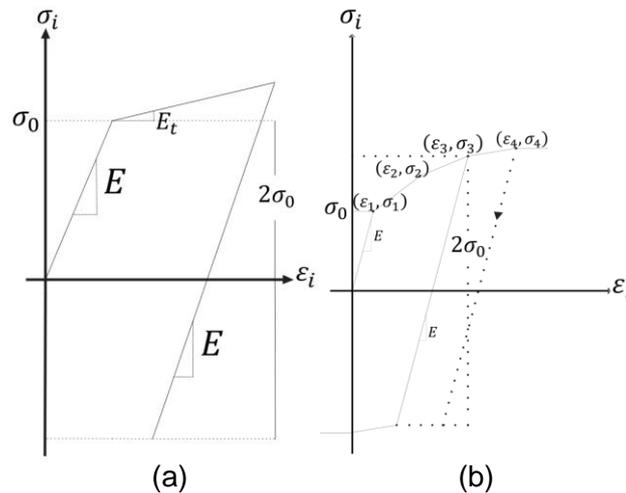


Figura 4.1 – Modelos de encruamento isotrópicos (a) bilinear e (b) multilinear.

onde $\dot{\epsilon}$ é a taxa de deformação plástica viscosa [s^{-1}], γ é o parâmetro de viscosidade do material [s^{-1}], σ é a tensão de Von Mises do material [N/m^2], σ_0 é a tensão de escoamento estática [N/m^2] e m é o parâmetro de encruamento. A tensão de escoamento estática é determinada experimentalmente e inserida no ANSYS através de algum modelo de plasticidade, como o de encruamento isotrópico bilinear. Os parâmetros de viscosidade e encruamento são complexos de serem determinados, e por isso será utilizado nesse trabalho o modelo de encruamento isotrópico multilinear (Figura 4.1 (b)).

4.4. Determinação das Curvas de Escoamento

Para se determinar as curvas de escoamento, é necessário realizar ensaios nos materiais que serão conformados. Altan et al., 2004, recomenda que sejam realizados ensaios de compressão para se determinar as curvas de escoamento de materiais que serão submetidos a processos de conformação, uma vez que ensaios de tração só resultam em um estado de tensões uniaxial por uma pequena região plástica. Apesar dessa desvantagem, Schaeffer, 2004, desenvolve um método para a obtenção de uma curva de escoamento através de ensaios de tração. Utilizando medições de força e de deslocamento ao longo do ensaio, determina-se a tensão de escoamento e a deformação instantânea através de

$$\phi = \ln \left(1 - \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (4.8)$$

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d_0^2} \left(1 - \frac{\Delta L}{L_0} \right) \quad (4.9)$$

onde ϕ é a deformação verdadeira, ΔL é o deslocamento [m], L_0 é o comprimento original do corpo de prova [m], σ é a tensão de escoamento [N/m^2], F é a força de ensaio [N] e d_0 é o diâmetro original do corpo de prova [m].

Schaeffer, 2004, ressalta que, no caso de processos a quente, torna-se importante considerar os efeitos da taxa de deformação na resistência do material. Dessa forma, caso seja utilizado um modelo que desconsidera efeitos dinâmicos, deve-se buscar ensaiar o material em uma faixa de taxa de deformação próxima da taxa de deformação do processo em análise.

5. METODOLOGIA

5.1. Ensaio de Tração

Para determinar as curvas de escoamento dos aços X210Cr12 e S235JR através de ensaios de tração foi utilizada a metodologia descrita por Schaeffer, 2004. Foram realizados ensaios de tração na mesma temperatura de conformação, ou seja, 1080°C, e com a taxa de deformação de 1 s⁻¹ para melhor replicar as condições do experimento. Foram usinados corpos de prova para ensaio de tração com os mesmos materiais utilizados na amostra de forjamento. Os corpos de prova confeccionados possuem comprimento útil de 16 mm e diâmetro de 8 mm. O ensaio foi realizado no RTI em uma máquina MTS acoplada a um sistema de aquecimento resistivo no qual o corpo de prova é acoplado por eletrodos de cobre, conforme mostrado na Figura 5.1. O procedimento de ensaio foi dividido em duas etapas, sendo a primeira um período de aquecimento até 1080°C e depois encharque por 60 s, e depois foi realizada a deformação com o controle feito através da taxa de deformação, sendo a temperatura mantida constante.



Figura 5.1 – Equipamento usado para os ensaios de tração.

Os dados obtidos foram a força e o deslocamento da máquina ao longo dos ensaios. Com eles, foram calculadas as curvas de escoamento dos dois materiais utilizando as equações 4.7 e 4.8. Para se reduzir o ruído, foi utilizado um filtro de média deslizante nos resultados obtidos. Para utilização no ANSYS, que possui limitação de no máximo 100 pontos para a definição do modelo de encruamento isotrópico multilinear, foram selecionados 52 pontos ao longo da curva. Os pontos escolhidos não ultrapassam os de tensão máxima devido à inabilidade do ANSYS de lidar com o amolecimento que ocorre nas deformações maiores. As curvas resultantes são mostradas na Figura 5.2.

Na curva do aço X210Cr12, existe uma queda súbita na região próxima dos 0,15 mm/mm de deformação, provavelmente devido a um deslize nos mordentes ou erro de leitura da máquina. Por isso, foram removidos os pontos lidos nessa parte do conjunto de dados.

Comparando com as curvas de escoamento do aço AISI D3, semelhante ao X210Cr12, obtidas por Najafi et al., 2017 (disponíveis no Anexo I), vê-se que o comportamento se encontra próximo do esperado.

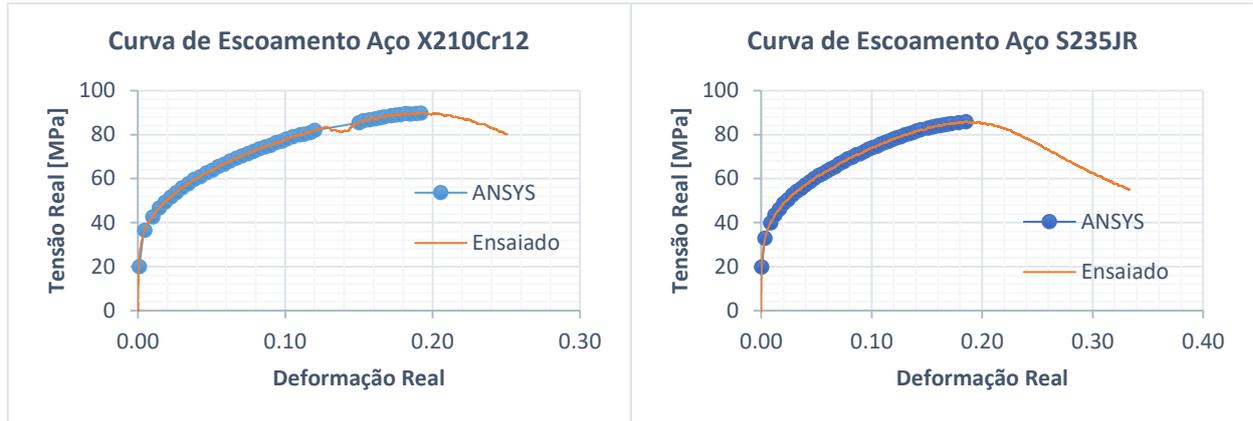


Figura 5.2 – Curvas de Escoamento dos aços X210Cr12 e S235JR.

5.2. Modelos Analíticos

As Equações (4.1), (4.2) e (4.3) foram utilizadas para calcular valores de força, deformação e de taxa de deformação analiticamente. Os resultados dos cálculos analíticos serão utilizados posteriormente para verificação e validação da simulação. A Tabela 5.1 resume as informações do problema em estudo e a Figura 5.3 mostra a geometria considerada.

Tabela 5.1 – Dados gerais do problema em estudo.

Núcleo		Prensa	
Material	Aço X210Cr12	Capacidade	1 MN
Diâmetro	66 mm	Velocidade	24 mm/s
Altura	91,1 mm	Compressão	32 mm
Casca		Tempo	1,2 s
Material	Aço S235JR	Temperatura	1080°C
Espessura	4,50 mm		

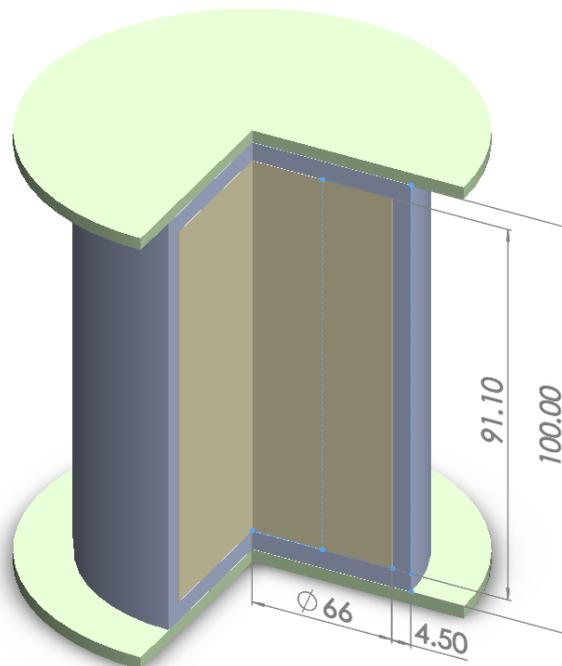


Figura 5.3 – Vista em corte da geometria estudada (dimensões em [mm]).

Utilizando a equação 4.1 com as dimensões do núcleo e a curva de escoamento obtida na Seção 4.1 foi encontrada uma força de compressão de 213 kN no início do processo e 960 kN no final do processo. A deformação média da amostra é de 0,356 mm/mm, e a taxa de deformação encontrada varia de $0,60 \text{ s}^{-1}$ no início do processo até $0,86 \text{ s}^{-1}$ no final.

5.3. Procedimento Experimental de Conformação

Para realizar o procedimento experimental de conformação, uma amostra foi fabricada envolvendo um cilindro de aço X210Cr12 em um tubo de aço S235JR e fechando os topos com discos de aço S235JR. Os discos foram unidos ao tubo com uma solda de topo. Conforme foi verificado posteriormente com a amostra cortada na longitudinal após os testes, a solda não teve penetração total.

O procedimento experimental consistiu na compressão da amostra na prensa selecionada. A amostra foi tratada termicamente conforme o procedimento descrito por Jirková et al., 2018, sendo primeiramente aquecida até 1240°C , resfriada e depois aquecida novamente até 1080°C . Após um período de encharque para homogeneização da temperatura na amostra, a mesma foi retirada do forno e imediatamente comprimida. Seguindo a compressão, a amostra foi cortada na longitudinal em uma cortadora de jato de água para ser feita a medição das dimensões finais. A Figura 5.4 mostra a amostra antes e depois da compressão.

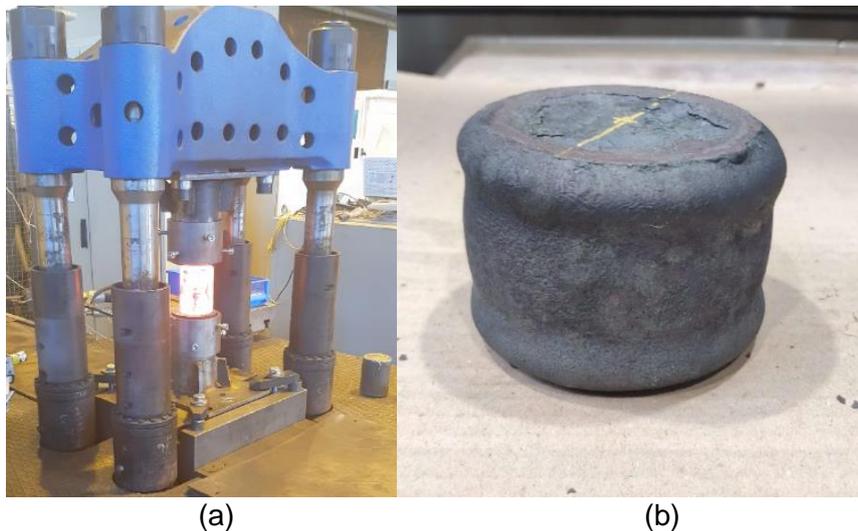


Figura 5.4 – (a) Amostra na prensa antes da compressão. (b) Amostra após a compressão.

5.4. Simulação no ANSYS

5.4.1. Modelagem e Configuração do Problema

Utilizando da axissimetria da peça e do processo, pode-se resumir a análise numérica a um caso bidimensional. Também foi considerado que a análise é simétrica na vertical. A amostra foi modelada no ANSYS Workbench 2019 R1 utilizando as dimensões descritas na Tabela 5.1. Devido à falta de penetração da solda que foi feita para fabricar a casca, foi considerado que a parte lateral e a parte do topo da casca são componentes diferentes para a simulação e são unidos através de um contato colado com profundidade de 1,5 mm, simulando a penetração da solda.

Utilizando a dimensão resultante do procedimento experimental de uma altura de 68 mm, a compressão da peça foi definida através do deslocamento de 16 mm de uma superfície posicionada acima da amostra que serve a função de matriz. A Figura 5.5 detalha as condições de contorno aplicadas.

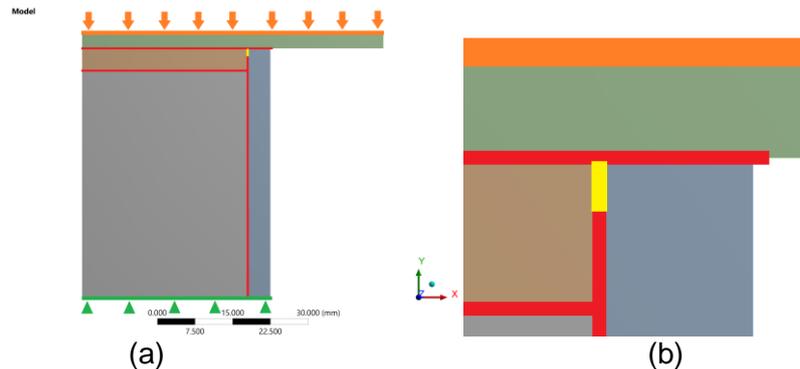


Figura 5.5 – (a) Condições de contorno aplicadas na simulação. (b) Detalhe da casca na diagonal. Regiões em vermelho indicam contato friccional, e regiões em amarelo indicam contato colado.

No ANSYS, as interações entre elementos de corpos diferentes são mediadas através de elementos de contato que acoplam os nós dos corpos de acordo com a física definida pelo usuário. Com exceção à parte soldada entre os dois componentes da casca, que foram definidos como colados, todos os contatos foram definidos como friccional. Os contatos colados acoplam totalmente os nós da interface entre os componentes, impedindo qualquer tipo de movimento relativo. Os contatos friccional utilizam a formulação de Coulomb para calcular a tensão cisalhante na interface baseada na pressão de contato. Seguindo recomendações dadas por Schaeffer, 2006, foi considerado um coeficiente de atrito unitário para os contatos friccional.

Para melhorar a convergência, foi utilizada a formulação Lagrangiana Aumentada de contato, que considera os elementos de contato como molas com uma rigidez dependente das propriedades dos materiais em contato e na pressão de contato. Essa formulação é apropriada para a maior parte dos problemas de contato, e é menos sensível a variações na rigidez e, apesar de usualmente necessitar de um maior número de iterações, tem melhor convergência que a formulação Lagrangiana Normal [ANSYS, 2019].

Para detectar os contatos foi utilizado o Método de Contato Baseado em Projeção de Superfície. Esse método faz uma projeção normal aos nós que são identificados que podem estar em contato, e calcula uma média de penetração para a superfície projetada. Essa média de penetração torna o contato mais preciso e o campo de tensões mais suave, ao invés de resultar em picos nos nós dos elementos de contato, como é o caso dos métodos tradicionais, que se baseiam na penetração dos nós [ANSYS, 2019].

Seguindo recomendações do ANSYS para problemas em que o coeficiente de atrito é maior do que 0,2, foi utilizado o solver Newton-Raphson Assimétrico para evitar problemas de convergência. Foi ativado o controle automático de subpassos para variar o tempo dos mesmos e reduzir o tempo de processamento. A hipótese de pequenos deslocamentos foi desconsiderada.

A Tabela 5.2 resume os parâmetros da simulação.

Tabela 5.2 – Parâmetros utilizados na simulação.

Solver	
Solver	Newton-Raphson Assimétrico
Subpassos	250, com controle automático
Formulação	
Geometria	Axissimétrica
Atrito	Coulomb
Plasticidade	Multilinear
Contato	Lagrangiano Aumentado
Deteção de Contato	Contato Baseado em Projeção de Superfície

5.4.2. Malha

A malha escolhida é composta de elementos PLANE183, um elemento quadrático com suporte a axissimetria e plasticidade. Foi utilizada uma malha estruturada para todos os corpos, e a malha na matriz foi fixada em 1 mm de tamanho para evitar problemas de penetração excessiva causada pela falta de nós na ferramenta.

Para se fazer o estudo de convergência de malha, foi selecionada inicialmente uma malha pouco refinada com elementos de 10 mm no núcleo e 1,5 mm na casca. A malha foi então refinada até não se identificar mais uma variação significativa nos parâmetros escolhidos para a comparação, que foram a força de conformação, a deformação plástica máxima e a deformação plástica mínima.

5.4.3. Simulação Estática e Dinâmica

Conforme discutido por Altan et al., 2004 e Schaeffer, 2004, processos de conformação a quente são altamente dependentes da taxa de deformação. Por isso, idealmente, simulações desse tipo de processo deverão incluir os efeitos da velocidade de carregamento para garantir melhores resultados. Apesar disso, simulações transientes exigem um tempo computacional maior para atingirem a convergência, e então devem ser evitadas caso os efeitos transientes não afetem os resultados.

No presente estudo, o modelo de material, aspecto mais sensível à variações na velocidade de carga, não considera efeitos dinâmicos. Para verificar a influência dos efeitos transientes, será feita uma simulação dinâmica utilizando a malha convergida e, subsequentemente, serão comparados os resultados. Nesse caso, será analisada a força ao longo do tempo do processo.

5.5. Análise dos Resultados

Devido à falta de equipamento de instrumentação disponível para realizar medições ao longo do processo de compressão, a comparação de resultados experimentais com resultados numéricos será a geometria deformada (comparação qualitativa), que é o parâmetro de maior interesse da simulação. A força de forjamento e as deformações serão comparadas com os cálculos analíticos fornecidos por Schaeffer 2004. Segundo discutido por Snape et al., 2002, a deformação no caso de compressão a quente de aço é insensível a variações na maioria dos parâmetros de uma simulação, salvo pelo coeficiente de atrito. Os resultados numéricos também serão comparados com os trabalhos desenvolvidos por Kajtoch, 2007 e Lin et al., 2008, onde são discutidos os campos de deformações e de tensões no processo de compressão de cilindros.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Estudo de Convergência de Malha

Foram utilizadas 6 malhas para se realizar o estudo. A malha final escolhida tem tamanho de 2 mm no núcleo e 0,4 mm na casca, contando com 3037 elementos e 9765 nós, e é mostrada na Figura 6.1. Foi encontrado que malhas diferentes necessitavam de configurações diferentes de rigidez de contato e número de subpassos para atingir a convergência. A Tabela 6.1 mostra os resultados obtidos para cada uma das malhas. Percebe-se que dentre os parâmetros utilizados para a comparação, somente a deformação plástica mínima apresentou diferenças significativas entre malhas diferentes.

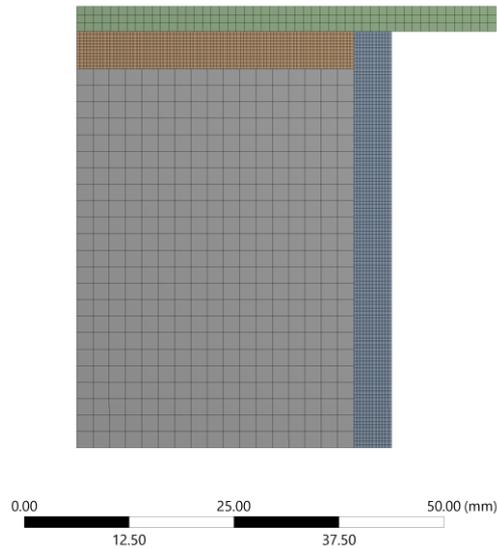


Figura 6.1 – Malha utilizada nas simulações.

Tabela 6.1 – Resultados do estudo de convergência de malha.

Nós	Elementos	Força de Conformação (kN)	Deformação Plástica Média	Deformação Plástica Média no Núcleo
2345	665	574.45	0.255	0.427
2556	728	574.28	0.256	0.427
8866	2746	573.28	0.230	0.427
8988	2784	573.43	0.233	0.428
9765	3037	575.15	0.251	0.430
31480	10116	574.45	0.232	0.430

6.2. Simulação Estática e Dinâmica

A Figura 6.2 compara os resultados das simulações estática e dinâmica com os gráficos das grandezas de interesse. Percebe-se que as diferenças não são significativas, devido à independência do modelo de material escolhido à taxa de deformação. Caso um modelo de material viscoplástico tivesse sido escolhido, a diferença entre as duas simulações seria maior.

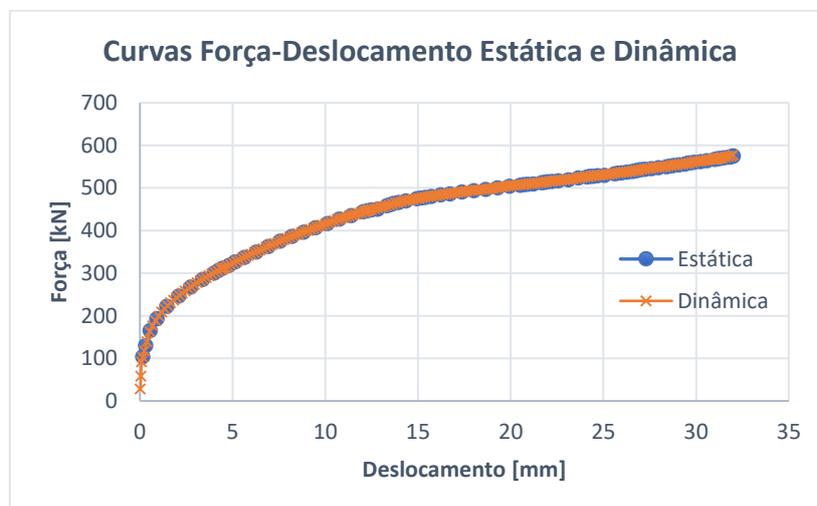


Figura 6.2 – Curvas de força-deslocamento obtidas para simulação estática e dinâmica.

6.3. Resultados

6.3.1. Geometria Deformada Experimental e Numérica

A Figura 6.3 mostra a amostra deformada após o experimento e a Figura 6.4 mostra o resultado obtido no ANSYS. Qualitativamente, os resultados apresentam o mesmo comportamento de embarrilamento no núcleo e de descolamento da casca próximo ao topo da amostra.

Analisando quantitativamente, algumas das dimensões, como o diâmetro no centro da amostra e os diâmetros do núcleo no início e fim da região de descolamento da casca se encontram próximas daquelas obtidas experimentalmente. As maiores discrepâncias encontradas são com relação à separação da casca, que não foi possível ser reproduzida com precisão nas simulações numéricas. A simulação resultou em um descolamento menos acentuado que o real, com a altura da região descolada sendo menor, assim como o diâmetro. É interessante observar que espessura da casca não apresentou redução significativa, nem nos experimentos nem nas simulações.

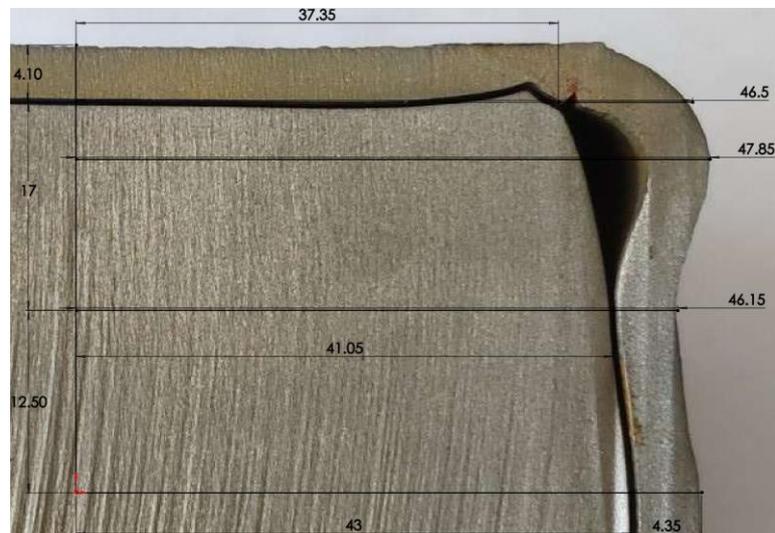


Figura 6.3 – Amostra após a conformação. Dimensões em [mm].

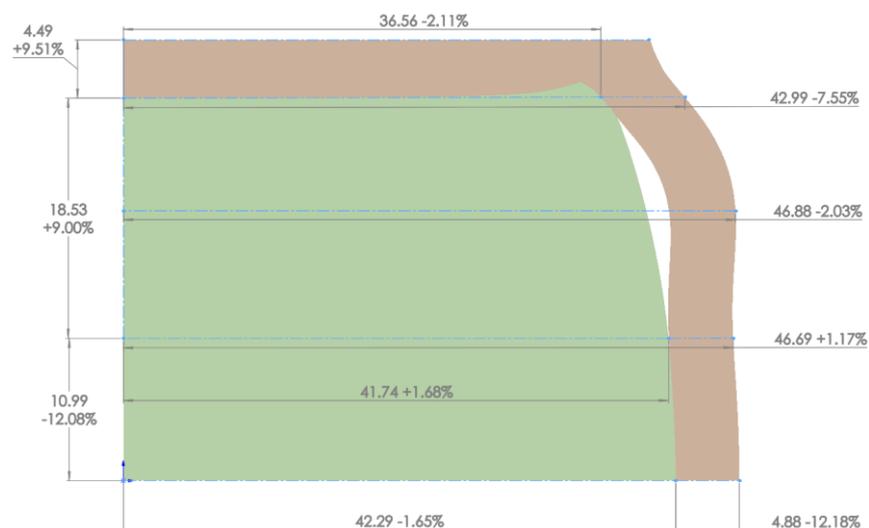


Figura 6.4 – Geometria deformada obtida após simulação no ANSYS. Dimensões em [mm]. Valores percentuais indicam o erro relativo.

6.3.2. Força de Compressão

A Figura 6.5 mostra os gráficos da carga de compressão ao longo do tempo para a simulação numérica e conforme a metodologia descrita na seção 4.1. Percebe-se uma diferença considerável entre os dois resultados. No início da compressão, a diferença é de 14% entre os casos, porém, ao final do processo, o cálculo analítico resulta em uma força de 74% daquela encontrada na simulação numérica, e um erro médio de 57%.

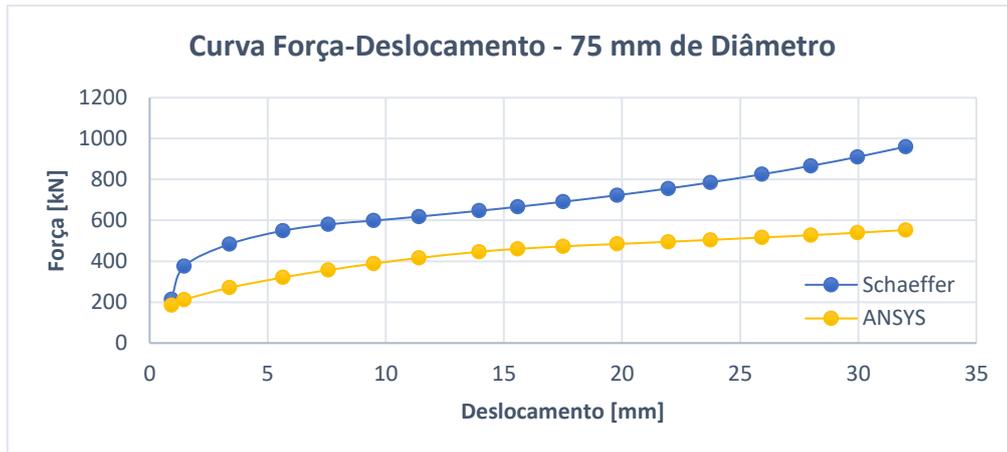


Figura 6.5 – Gráfico força-deslocamento obtidos através de cálculos analíticos considerando diâmetro da amostra de 75 mm e simulação no ANSYS.

Analisando o progresso da compressão, identifica-se que a causa da grande discrepância entre o cálculo analítico e a análise numérica é a separação da casca no topo da superfície lateral do núcleo. Quando o deslocamento chega a 25% do total, inicia-se a separação da casca, causada pela falta de penetração da solda e pela diferença entre a ductilidade entre os materiais do núcleo e da casca, e a região da casca separada passa a sofrer esforços de flexão ao invés de compressão. Essa mudança de carregamento compressível para de flexão resulta em uma perda da rigidez na região separada da casca, o que reduz consideravelmente a força necessária para realizar o resto da compressão da peça.

Ao se realizar novamente os cálculos desconsiderando a casca, ou seja, alterando o raio na equação 4.1 para 32,50 mm, encontra-se a curva vista na Figura 6.6, bem mais próxima dos resultados numéricos. Ainda há uma diferença de aproximadamente 120 kN, equivalente a 20%, no final, porém o erro médio se reduz para 14%.

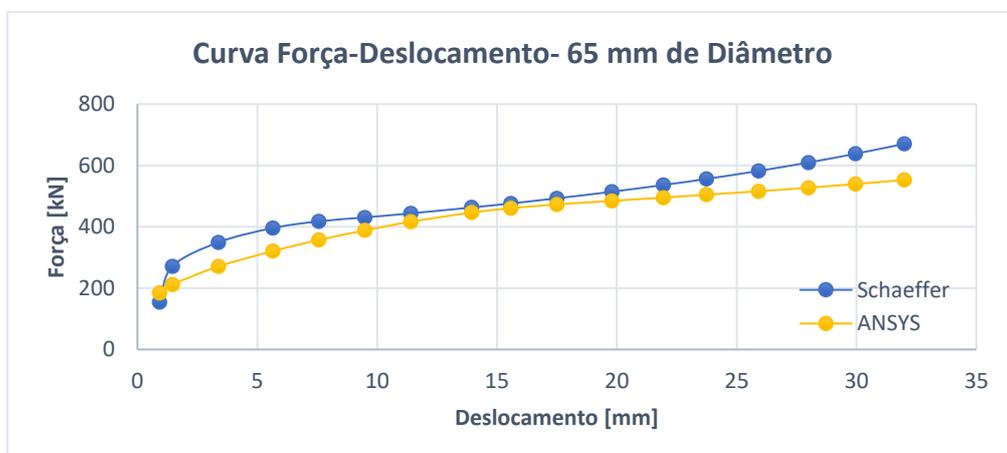


Figura 6.6 – Gráfico força-deslocamento obtidos através de cálculos analíticos considerando diâmetro da amostra de 65 mm e simulação no ANSYS.

Na curva da força de compressão numérica, percebe-se que no início o crescimento é maior, resultante do simultâneo aumento da área de contato e também do endurecimento. Uma vez que é atingido o deslocamento de aproximadamente 17 mm, correspondente a 0,192 mm/mm de deformação, ponto de tensão máxima para a curva de escoamento do aço X210Cr12, a curva força-deslocamento tem a sua inclinação reduzida, visto que o aumento da carga se torna dependente somente do aumento da área da seção transversal da amostra.

6.3.3. Campos de Tensões e de Deformações

A Figura 6.7 mostra o campo de deformações do núcleo após a conformação. Percebe-se que há no centro uma região de deformação máxima atingindo uma deformação de 0,886. O comportamento do campo de deformações se assemelha àquele mostrado em Kajtoch, 2007, com uma região máxima no centro e diminuindo conforme se distancia dessa região. Seguindo na diagonal, vê-se que a redução é menor, e encontra-se na borda da amostra uma região em que as deformações aumentam. Diferentemente do encontrado por Kajtoch, 2007, a fronteira superior do núcleo não é plana, uma vez que o núcleo não está em contato com a ferramenta, e sim com a casca.

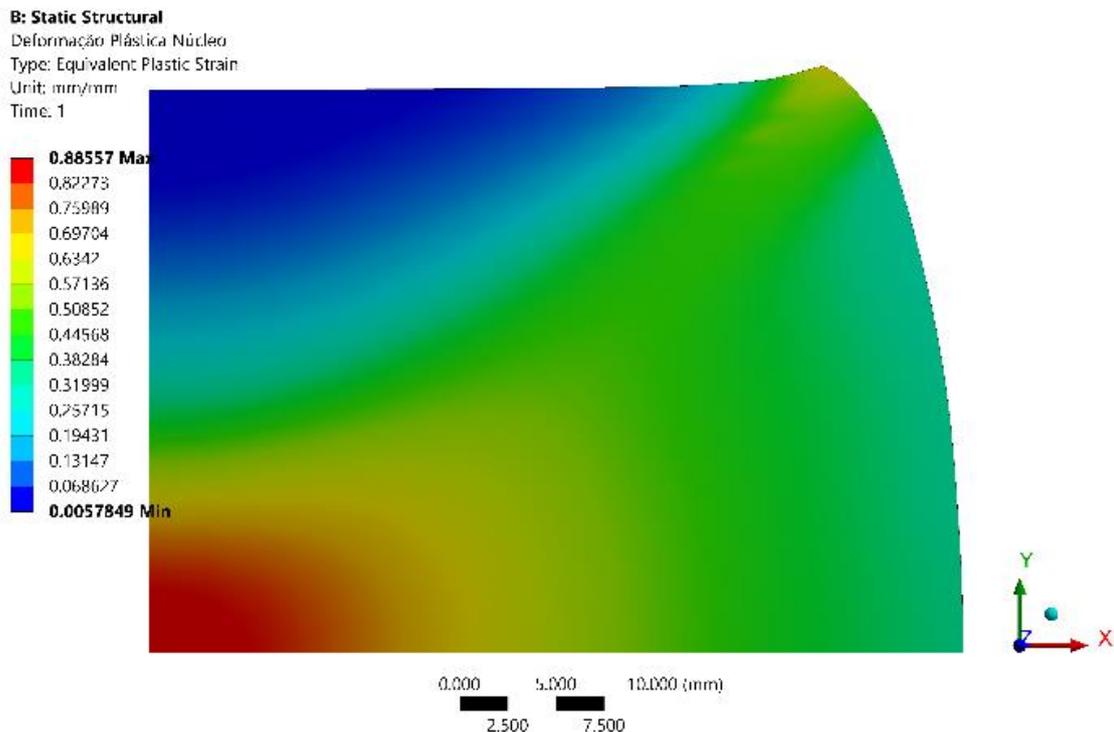


Figura 6.7 – Campo de deformações plástica no núcleo.

A Figura 6.8 mostra os campos de deformações na casca da peça. Há uma distribuição mais uniforme na casca, com a lateral apresentando uma deformação média de 0,30 mm/mm sem grandes variações, e deformações muito pequenas no topo. No canto da casca é onde se observa o maior gradiente de deformações, devido a combinação de compressão e do atrito da ferramenta e dos esforços compressivos e flexionais resultantes na região.

No Apêndice A estão mostrados os campos de tensão, enquanto no Apêndice B estão mostradas as distribuições de tensão cisalhante resultante da fricção e das tensões normais de contato.

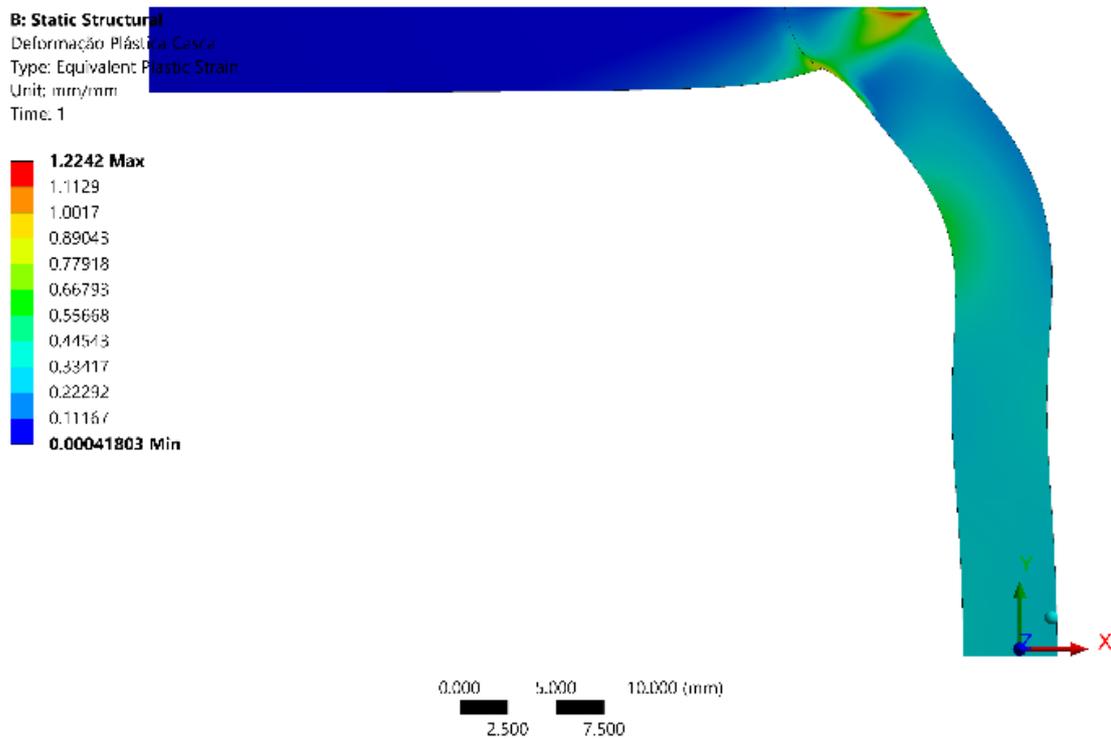


Figura 6.8 – Campo de deformações plásticas na casca.

7. CONCLUSÕES

Através da análise numérica foi possível obter os campos de deformação e deslocamentos da casca e do núcleo para o caso de compressão simples, a primeira etapa do processo de forjamento estudado por Jirková et al., 2018, com uma amostra de dimensões maiores. Para se realizar a análise numérica, foram realizados ensaios para determinar as propriedades dos aços X210Cr12 e S235JR, utilizados no núcleo e na casca respectivamente. Foi realizado um teste prático, comprimindo uma amostra em uma prensa para se correlacionar a geometria deformada experimentalmente com a geometria deformada obtida no ANSYS.

Foi realizado um estudo de qualidade de malha que apontou que 9765 nós são suficientes para captar as forças de conformação e alguns valores importantes do campo de deformações plásticas.

A simulação conseguiu captar o comportamento do processo de compressão, uma geometria semelhante, com o embarrilamento do núcleo e o descolamento da casca, porém não foi possível obter precisamente as dimensões, sobretudo na região de descolamento da casca.

Foi verificada a capacidade do ANSYS de realizar simulações desse tipo de processo, e também foram encontrados pontos fracos do *software*, como a incapacidade de lidar com curvas de tensão-deformação com inclinação negativa. Esse comportamento é bastante comum em materiais em alta temperatura, então deve ser utilizado um outro *software* caso seja desejada uma maior precisão.

Trabalhos futuros podem adicionar efeitos aqui não considerados, como efeitos de temperatura e utilizar um modelo viscoplástico para os materiais. Pode-se também realizar a mesma simulação utilizando *softwares* especializados, como o QForm e o DEFORM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS R2019a, “**ANSYS Theory Reference Guide.**” Em: ANSYS Help. ANSYS Inc., 2019.

Altan, T.; Ngaile, G.; Shen, G.; “**Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications**”, ASM International, 2004.

Bennet, C.J.; **“A comparison of material models for the numerical simulation of spike-forging of a CrMoV alloy steel”**, Computational Materials Science, vol 70, pp 113-122, 2013.

Chenot, J.L.; Béraudo, C.; Bernacki, M.; Fourment, L.; **“Finite Element Simulation of Multi Material Metal Forming”**, Procedia Engineering, vol 81, pp 2427-2432, 2014.

Jirková, H., Rubešová, K., Konopík, P., Opatová, K.; **“Effect of the Parameters of Semi-Solid Processing on the Elimination of Sharp-Edged Primary Chromium Carbides from Tool Steel”**, Metals, vol. 8, no. 9, 2018.

Kajtoch, J.; **“Strain In The Upsetting Process”**, Metallurgy and Foundry Engineering, vol 33, pp 51-61, 2007.

Kaur, J.; Pabla, B.S.; Dhimi, S.S.; **“A Review on Field Areas of Research in Forging Process using FEA”**, International Journal of Engineering Research & Technology, vol 5, n 1, 12 f., 2016.

Lenhard, A. L.; **“Análise da Influência das Propriedades do Material e Parâmetros do Processo na Simulação Numérica do Processo de Forjamento”**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

Lin, Y.C.; Chen, M.S.; Zhong, J.; **“Numerical simulation for stress/strain distribution and microstructural evolution in 42CrMo steel during hot upsetting process”**, Computational Materials Science, vol 43, pp 1117-1122, 2008.

Najafi, S. Z., Momeni, A., Jafarian, H. R., Ghadar, S.; **“Recrystallization, precipitation and flow behavior of D3 tool steel under hot working condition”**, Materials Characterization vol. 132, pp. 437–447, 2017.

Schaeffer, L.; **“Conformação Mecânica”**, Imprensa Livre, Porto Alegre, 2ª edição, 2004

Schaeffer, L.; **“Forjamento: Uma Introdução ao Processo”**, Imprensa Livre, Porto Alegre, 2ª edição, 2006

Snape, G.; Clift, S.; Bramley, A.; **“Parametric sensitivity analyses for FEA of hot steel forging”**, Journal of Materials Processing Technology, vol 125-126, pp 353-360, 2002.

De Souza, S. A., **“Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos. Fundamentos Teóricos e Práticos”**, Blücher, São Paulo, 5ª edição, 1982.

Zhang, D.W.; Ou, H.; **“Relationship between friction parameters in a Coulomb–Tresca friction model for bulk metal forming”**, Tribology International, vol 95, pp 13-18, 2016.

ANEXO I

A Figura I.1 mostra diversas curvas de escoamento obtidas para o aço AISI D3, de composição química semelhante ao aço X210Cr12, para diferentes condições de temperatura e taxa de deformação.

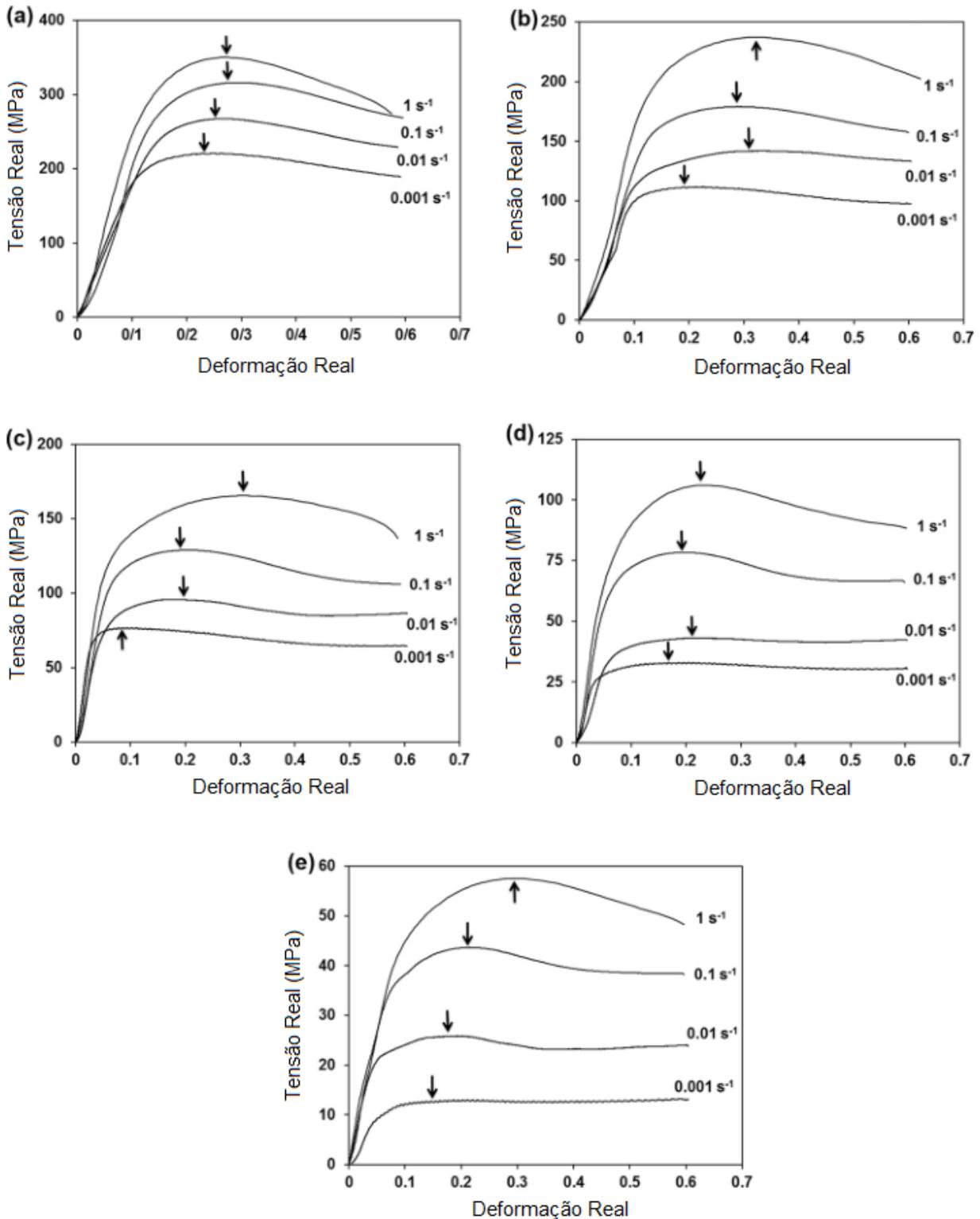


Figura I.1 – Curvas de escoamento do aço AISI D3. Ensaios de compressão realizados a (a) 800°C, (b) 900°C, (c) 1000°C, (d) 1100°C e (e) 1200°C.

A Figura II.1 mostra a distribuição de deformações durante a compressão de um cilindro de cobre 99,9% puro e de um cilindro aço SAE 1020 (0,20% C).

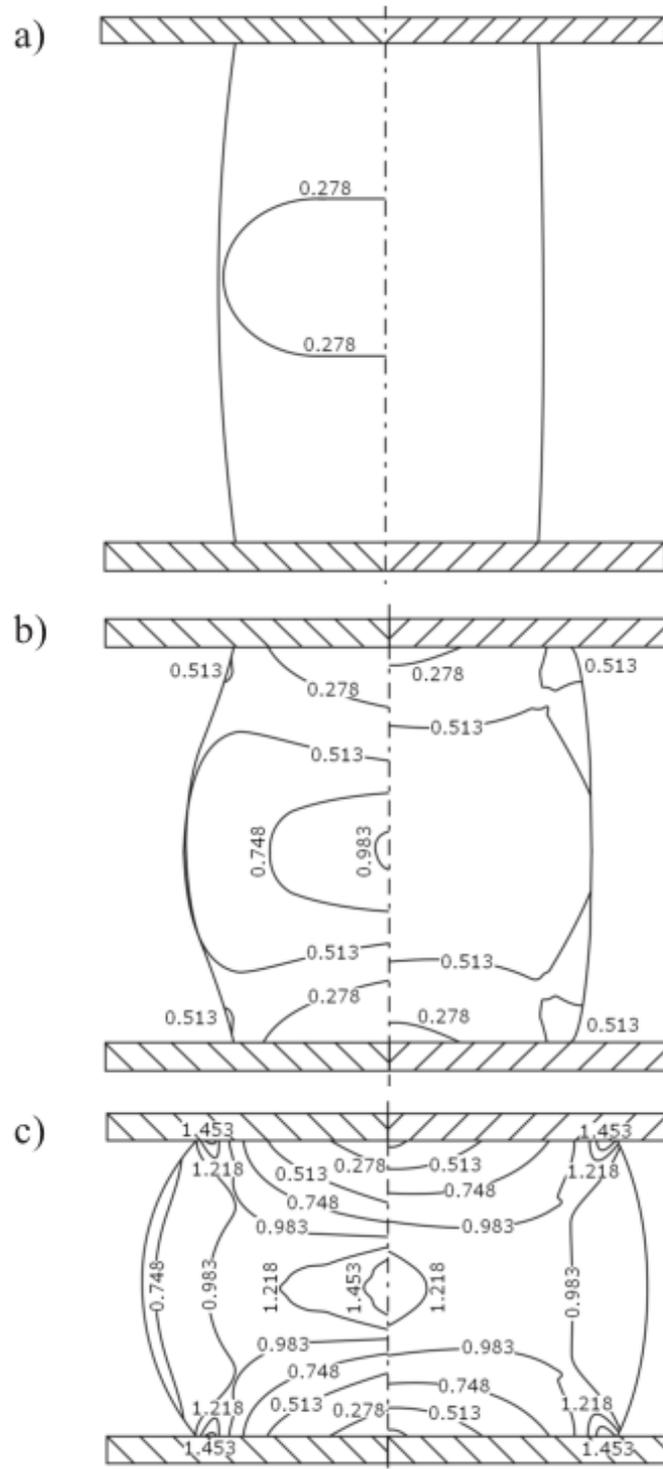


Figura II.1 – Distribuição de deformações na vista de seção de cilindros de cobre 99,9% (esquerda) e aço SAE 1020 (direita) ao longo do processo de compressão. Deformações de (a) 0,182, (b) 0,405 e (c) 0,693.

APÊNDICE A – CAMPOS DE TENSÃO NO NÚCLEO E NA CASCA

A Figura A.1 mostra o campo de tensão no núcleo. Ao contrário do campo de deformações, o campo de tensões é bastante uniforme, devido ao fato que a grande maioria do núcleo atinge a deformação máxima da curva de escoamento definida, que ocorre a uma deformação de 0,192.

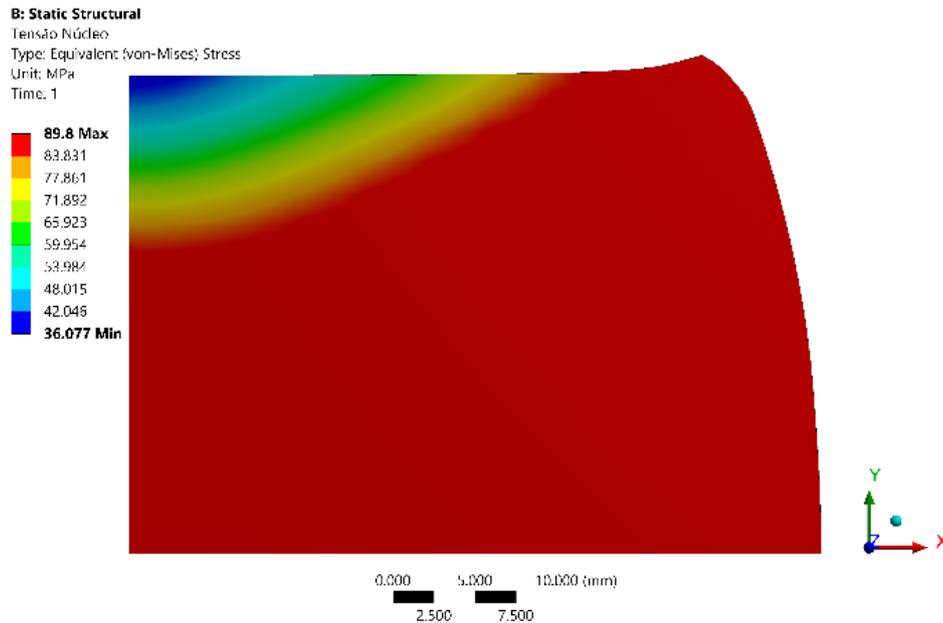


Figura A.1 – Campo de tensão no núcleo.

A Figura A.2 mostra o campo de tensão na casca. Seguindo uma distribuição semelhante às do núcleo, a lateral da casca atinge a deformação máxima, chegando na tensão máxima do modelo de material. Assim como no núcleo, no topo da casca há um gradiente considerável no topo, chegando a 13 MPa no centro do topo.

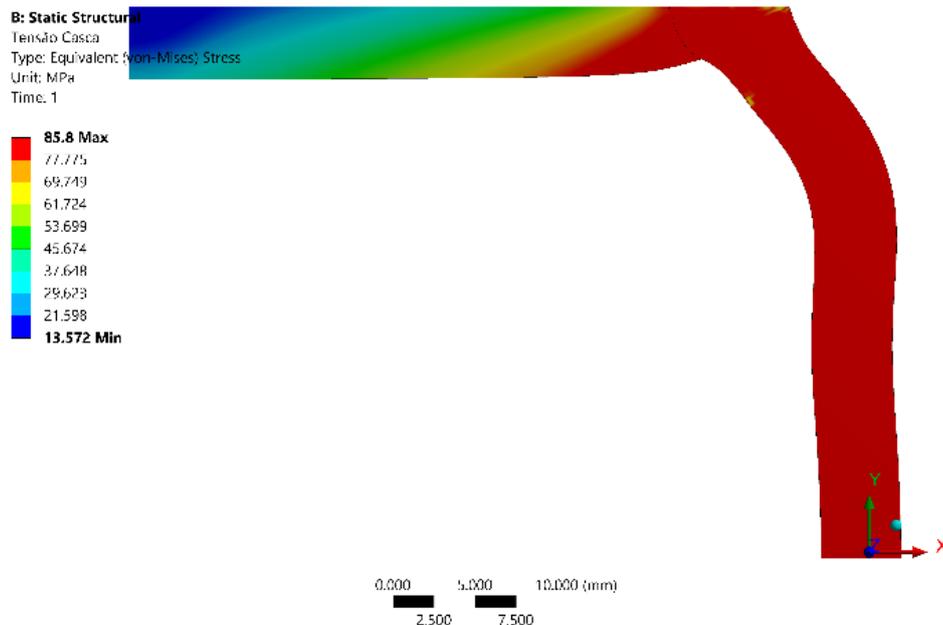


Figura A.2 – Campo de tensão no núcleo.

APÊNDICE B – TENSÃO CISALHANTE E PRESSÃO DE CONTATO

A Figura B.1 mostra a distribuição de tensões cisalhantes resultantes do atrito entre os diferentes corpos na simulação.

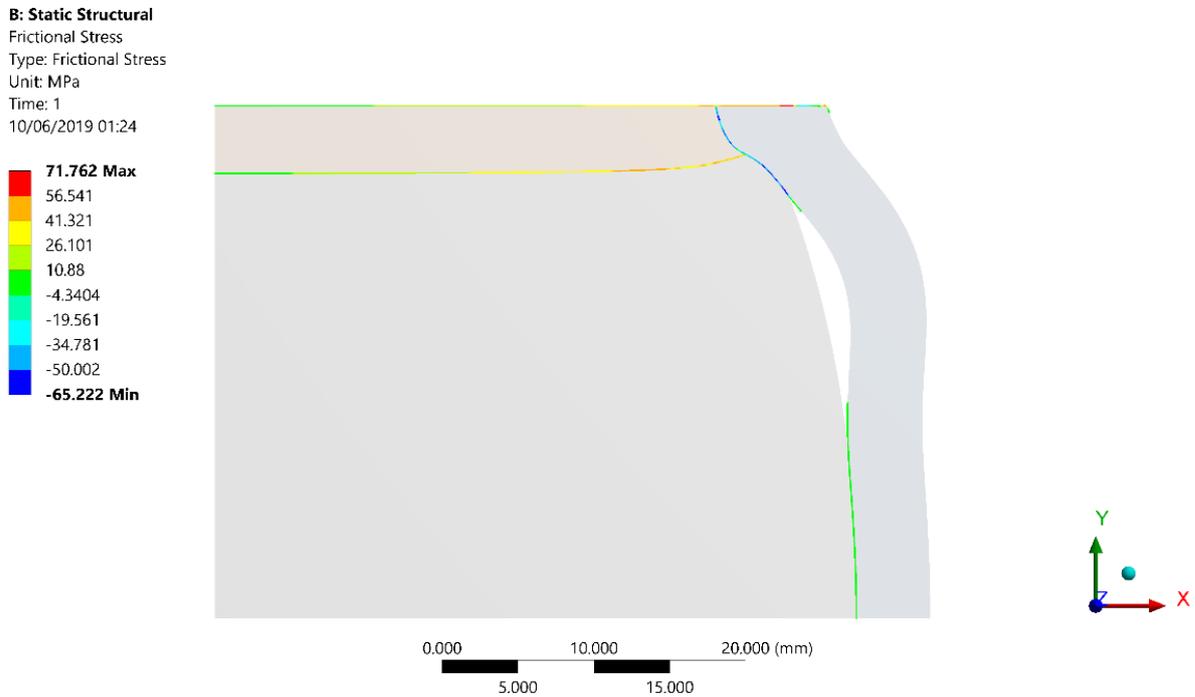


Figura B.1 – Distribuição de tensões cisalhantes simuladas.

A Figura B.2 mostra a distribuição de pressões de contato na simulação.

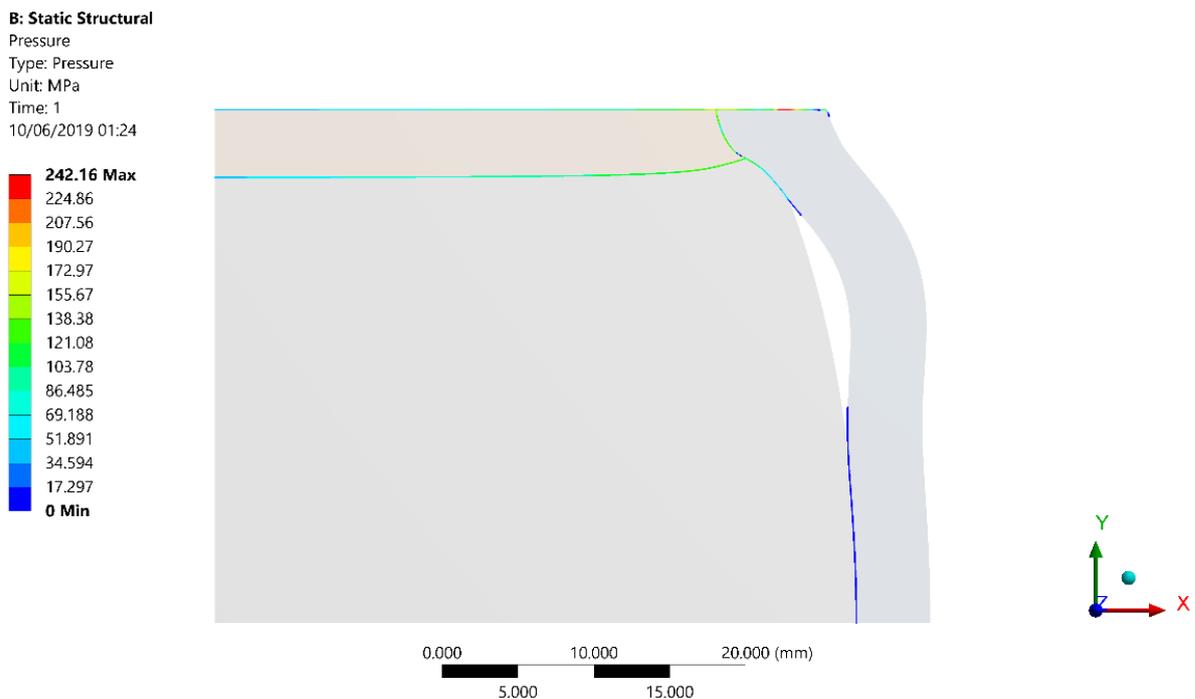


Figura B.2 – Distribuição de pressões de contato.