

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

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE DANO USANDO ENSAIOS DE TRAÇÃO PARA
A SIMULAÇÃO DA RUPTURA DÚCTIL EM MATERIAIS METÁLICOS

por

Bernardo Affonso Squeff

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, novembro de 2021

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Affonso Squeeff, Bernardo
CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE DANO USANDO ENSAIOS DE
TRAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DA RUPTURA DÚCTIL EM MATERIAIS
METÁLICOS / Bernardo Affonso Squeeff. -- 2021.
21 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, 2021.

1. Mecânica dos Sólidos. 2. Simulação
computacional. I. Rossi, Rodrigo, orient. II. Título.

Bernardo Affonso Squeff

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE DANO USANDO ENSAIOS DE TRAÇÃO PARA
A SIMULAÇÃO DA RUPTURA DÚCTIL EM MATERIAIS METÁLICOS

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(a) do Curso de Engenharia Mecânica

Mecânica dos Sólidos

Orientador: Rodrigo Rossi

Comissão de Avaliação:

Jakson Manfredini Vassoler

Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, novembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos colegas de universidade que auxiliaram e contribuíram no desenvolvimento deste trabalho de conclusão de graduação, de forma direta ou indireta.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2021

CALIBRAÇÃO DE UM MODELO DE DANO USANDO ENSAIOS DE
TRAÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DA RUPTURA DÚCTIL EM MATERIAIS
METÁLICOS

Affonso Squeff, Bernardo
bernardoasqueff@gmail.com

Resumo.

A motivação do tema do trabalho a ser desenvolvido surgiu a partir da proposição de entender um processo de ruptura/fratura dúctil a altas taxas. Busca-se realizar um estudo de caráter preliminar, baseado na calibração de um modelo de dano dúctil para descrever um ensaio de tração. Durante o estudo é avaliado métodos de simulação de dano e comportamento da simulação dinâmica. A calibração é feita por meio da análise de pré e pós estrição de ensaios. O problema é avaliado por simulação computacional no software de elementos finitos Abaqus. Obtém-se a curva de tensões com dano, um modelo para descrever o início de dano, a curva de tensões sem dano, a regra de evolução do dano e por fim o valor crítico de dano. Assim fica possível simular em toda sua duração o ensaio de tração.

Palavras-chave: dano dúctil, simulação de dano, calibração de modelo de dano, modelagem de dano

Calibration of a ductile damage model using tensile coupon test for simulating the ductile rupture of metallic materials

Abstract.

The motivation for the work theme to be developed came from the proposal of understanding a ductile rupture/fracture process at high rates. A preliminary character study will be carried out, based on the calibration of a ductile damage model to describe a tensile coupon test. During this study it is evaluated damage simulation methods and behaviors during dynamic simulations. Calibration is done through the analysis of pre and post necking test results. The problem is validated by computer simulation done by Abaqus finite element software. A obtained a stress curve with damage, a model for decreasing or starting damage, a stress curve with damage, a rule for damage evolution and at the end the critical damage value are obtained. This makes it possible to simulate throughout its duration the tensile coupon test.

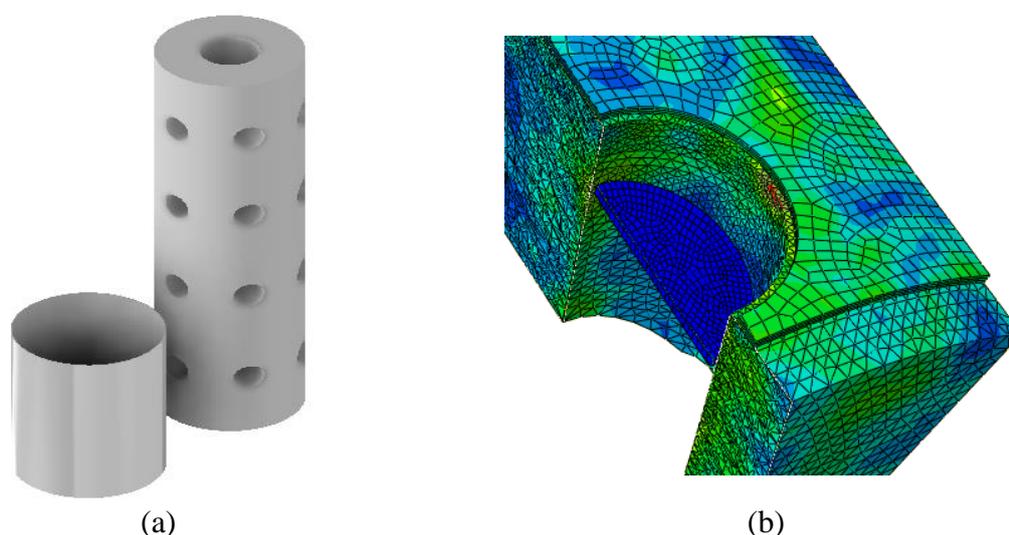
Keywords: ductile damage, damage simulation, damage model calibration, damage modelment

1. INTRODUÇÃO

O comportamento de tensão-deformação e do estado de danificação de um componente é de interesse para entender a resistência e capacidade estrutural na região após iniciação de dano. O dano em metais dúcteis, que é o estudado aqui, ocorre após o limite de início de dano ser excedido. Esse limite não é excedido necessariamente na sobrecarga do componente, pode ser apenas a região de trabalho do componente. Neste caso destaca-se a importância da avaliação do dano, pois permite o entendimento do comportamento do componente quando funcionando dentro desta região.

A motivação do tema do trabalho a ser desenvolvido surgiu a partir da proposição por colegas de pesquisa sobre o desafio de entender um processo de ruptura/fratura dúctil a altas taxas de um tubo em conformação eletromagnética contra uma matriz tubular com furos. Na figura 1 abaixo representa-se o caso em questão, desenho das peças e primeiros passos de modelo computacional.

Figura 1 – (a) Tubo e matriz da conformação (b) Tentativas de simulação



Sabe-se que entendimento, predição e aplicação de processos de deformação com dano, a fim de entender o processo de ruptura dúctil ou mesmo frágil de materiais, por si só já possuem uma alta complexidade associada, sendo maior ainda se as deformações ocorrem em altas taxas. E isto é o que acontece no processo de corte do tubo que foi proposto para entendimento neste trabalho. Logo, busca-se realizar um estudo de caráter preliminar, visando primeiramente o aprofundamento nos conhecimentos sobre os métodos de modelagem envolvendo grandes deformações sujeitos à degradação/dano. Assim, é possível que no caso de posterior aprofundamento do estudo não exija retrocessos nos procedimentos de modelagem.

Através da análise destes procedimentos de modelagem definiu-se o estudo de um modelo de dano dúctil e sua calibração como primeiro passo de uma possível continuação da modelagem do processo de conformação eletromagnética. A calibração é feita conforme realizado no trabalho de Yang et al. (2020), onde analisa-se a pré e pós estrição de ensaios de tração.

O mecanismo atuante neste caso do ensaio de tração é o de fratura dúctil, este é composto pelas etapas de nucleação, crescimento e coalescência de vazios. A fratura dúctil de um material metálico ocorre após extensa deformação plástica. E sua causa principal é o carregamento além do limite de resistência à tração do material.

Assim, para que se represente mais corretamente a resposta do material nesta situação, é necessária a utilização de modelos que contabilizam dano, modelos que são capazes de numericamente descrever sua influência. Nesse contexto, o estudo do dano auxilia na capacidade de previsão do seu efeito acumulado nas propriedades do material sem a necessidade da obtenção de uma complexa descrição microscópica que é pouco aplicável em análises de engenharia.

Embora o tema de degradação tenha sido motivado pelo processo de corte a altas taxas de deformação, tal como já comentado anteriormente, neste estudo define-se o critério dúctil para prever a iniciação do dano, aquele associado ao da calibração de modelo para prever a fratura no ensaio de tração. Este critério descreve a deformação plástica equivalente como função da triaxialidade das tensões e da taxa de deformação.

A etapa seguinte do trabalho seria partir para análise do caso de motivação, o tubo que sofre corte por conformação eletromagnética, um processo a altas taxas e altas deformações.

Tem-se então como objetivo principal o estudo de degradação, iniciação e evolução, causada por sobrecarga de componentes mecânicos de metais dúcteis. De forma a aprimorar a capacidade de previsão por simulação computacional do efeito do dano acumulado nas respostas de escoamento e elasticidade destes materiais. Sendo o objetivo prático deste estudo de modelagem da degradação melhorar a capacidade de representar com algum grau de verossimilhança o caso que motiva este trabalho, o caso de corte de tubo por conformação eletromagnética, representando assim qualitativamente o movimento, forças, deformações e tensões no componente.

2. FUNDAMENTAÇÃO

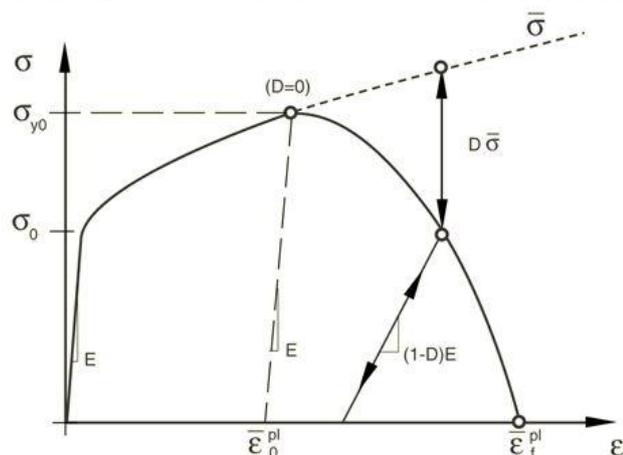
Primeiramente foi feita uma revisão bibliográfica. Definiu-se então a estratégia de tentar replicar o método utilizado no artigo Yang et al. (2020), para melhor entender os processos que envolvem a pesquisa na área de simulação de metais em deformações com dano.

Os procedimentos necessários para a simulação do ensaio de tração do metal em questão são a determinação das propriedades materiais que definem o comportamento elástico do material, a curva que define o comportamento plástico do material, a regra para determinação do início de dano e a regra para descrever a evolução do dano.

No processo de conformação de metais a ocorrência e evolução de dano no material levam à alteração no comportamento mecânico da estrutura. O dano atua causando uma progressiva redução da capacidade de resistência tendo impacto também no comportamento elástico do material. A ilustração abaixo, figura 2, representa o efeito do dano na curva de tensão-deformação. Nesta figura a variável que representa a degradação da resistência do material, dano mecânico, é representada pela letra D a qual para um certo volume representativo do material virgem, sem danificação, assume o valor nulo, $D=0$, e para um material totalmente danificado tem com valor $D=1$.

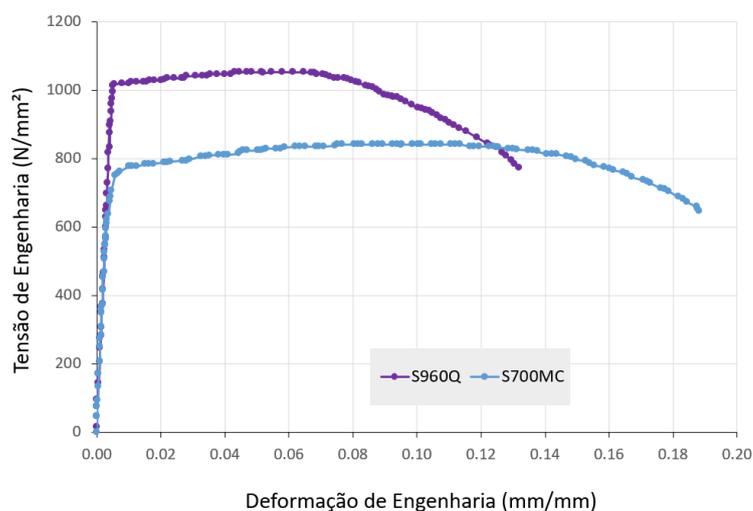
Na figura 2, a curva representada por $\bar{\sigma}$, curva tracejada, representa qual seria a curva de tensão sem dano, enquanto que a curva de linha contínua representa as tensões com dano. Na mesma imagem, σ_0 é a tensão de escoamento, E é o módulo de elasticidade, σ_{y0} é a máxima tensão antes do dano, $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ é a deformação plástica acumulada de início de dano e $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ é a deformação plástica acumulada no momento da fratura.

Figura 2 – Efeito do dano na curva de tensão-deformação



Busca-se então seguir os procedimentos realizados em Yang et al. (2020), que tem como finalidade, como já dito, calibrar um modelo de dano que utiliza a combinação de uma expressão linear e exponencial, modelo de Ling (1996), para descrever a relação tensão-deformação pós-estricção. Este modelo é ajustado baseado nas curvas dos ensaios de tração retiradas do trabalho de Feldmann et al. (2016), que estão representadas na figura 3.

Figura 3 – Curvas dos ensaio de tração



O problema é avaliado por simulação computacional no *software* de elementos finitos Abaqus/Explicit[®]. A partir da avaliação da simulação utilizando o modelo ajustado de Ling (1996), é possível observar os resultados de tensão e deformação reais, faz-se uma relação entre as tensões do modelo calibrado e uma estimativa de tensões para um componente sem dano e através deles é possível calibrar o modelo de evolução do dano. Quanto ao modelo de iniciação de dano, este seguirá aquele proposto por Rice-Tracey (1969). Já a fratura completa, de uma certa região representativa do material, no modelo numérico é modelada com o uso de uma variável de dano crítico.

O *software* comercial de elementos finitos Abaqus[®] descreve, no manual do usuário, dois principais mecanismos para a ocorrência de fratura de metais dúcteis, fratura dúctil e fratura de cisalhamento. De acordo com o manual, cada qual dos mecanismos contam de diferentes formas de critérios fenomenológicos para avaliação de iniciação de dano. No caso de estudo que motiva

este trabalho o mecanismo de fratura atuante é o de fratura por cisalhamento, já para o caso do ensaio de tração em Yang et al. (2020).

De acordo com Yang et al. (2020) o modelo de Rice-Tracey (1969) é então utilizado no critério de dano dúctil do Abaqus[®] para avaliação da iniciação de dano. No manual do Abaqus[®] o critério de iniciação de dano dúctil, $\bar{\varepsilon}_D^{pl}$, é descrito como um critério de base fenomenológica, o qual é dependente da triaxialidade η e da taxa de deformação plástica equivalente $\dot{\varepsilon}^{pl}$, Eq. (1).

$$\bar{\varepsilon}_D^{pl} = \bar{\varepsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\varepsilon}^{pl}) \quad (1)$$

Com base na equação anterior, o dano terá início quando a condição a seguir é cumprida, Eq (2).

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\varepsilon}^{pl})} = 1 \quad (2)$$

Após início de dano o material sofre uma degradação progressiva, conforme pode ser observado na curva de tensão-deformação no gráfico da figura 2. A regra que descreve a tensão danificada é baseada na curva de tensão sem dano e nos valores da variável de dano (D_i), conforme Eq. (3):

$$\sigma_i = (1 - D_i)\bar{\sigma}_i \quad (3)$$

Em que D_i também atua no cálculo da degradação da elasticidade do material. No contexto da modelagem do dano no *software* Abaqus[®] é possível realizar a remoção daquele elemento finito no qual a variável de dano atinge o valor definido de dano crítico, representada aqui por D_{cr} .

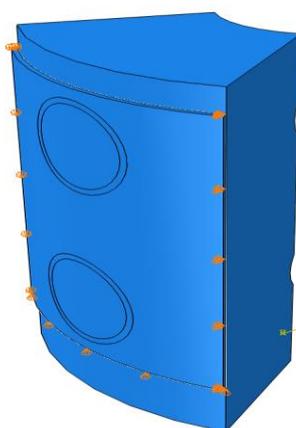
Para caracterizar a evolução do dano, o *software* Abaqus[®] permite que a evolução seja definida com base no chamado “deslocamento plástico efetivo” ou na energia dissipada no processo de dano. O deslocamento plástico efetivo começa a ser considerado a partir do início de dano e é proporcional à deformação plástica efetiva pós início de dano. No *software* é possível escolher entre definir as variáveis de dano D_i associadas a cada valor de deslocamento plástico efetivo ou para a energia de fratura

Foi escolhida a definição a partir do deslocamento plástico efetivo, pois se a definição for feita com base na energia faz-se necessária a seleção do modo de fratura no qual o componente está sujeito, o que não é simples de ser feito para o caso proposto inicialmente de conformação eletromagnética. Como a ideia é a de continuação deste trabalho no de caso proposto, assim faz mais sentido seguir com o cálculo por deslocamento efetivo plástico.

Observa-se aqui a necessidade de uma malha de elementos finitos adequada pois no caso da fratura isto tem efeitos consideráveis nos resultados obtidos. Não somente, mas também afeta o incremento de tempo da simulação numérica explícita e por consequência o custo computacional, como será apresentado nos resultados. No entanto, existem outros fatores que precisam ser avaliados e métodos que precisam ser aplicados para diminuição desse custo. Sendo uma das situações o ensaio de tração que é realizado de forma quasi-estática e simulado de forma dinâmica no Abaqus/Explicit[®], o maior tempo de duração do passo da simulação leva a dificuldades de estabilidade da solução.

Em termos do trabalho de conformação eletromagnética, que foi desenvolvido até certo ponto, vale ressaltar parte da sua fundamentação teórica, pois justifica e explicita alguns dos conteúdos avaliados neste trabalho. Para a simulação do caso de conformação eletromagnética utiliza-se um modelo constitutivo viscoplástico tal que contabilize os efeitos das altas deformações e altas taxas de deformação, tal como um modelo tipo aquele conhecido por Johnson-Cook (1983). É preciso também selecionar o modelo para avaliação do dano. É utilizado um critério dúctil para prever a iniciação do dano, sendo este no caso o modelo/critério de dano de Johnson-Cook (1985), diferente do modelo de viscoplasticidade anterior, este leva em conta a taxa de deformação e a triaxialidade da tensão. A partir deste ponto define-se a forma como o dano evolui, sendo a escolhida a evolução exponencial. A figura abaixo, Fig. 4, apresenta a construção do modelo com simetrias no software de elementos finitos.

Figura 4 - Modelo do tubo e matriz com condições de contorno



3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho segue aquela do trabalho de Yang et al. (2020). Feita a partir da obtenção dos dados experimentais de tração.

3.1 Resultados experimentais

O primeiro passo do procedimento realizado neste trabalho é a obtenção dos dados do ensaio de tração, quase-estático. Os resultados experimentais deste ensaio foram retirados do artigo de Feldmann et al. (2016), RUOSTE (Rules on High Strength Steel), que estuda as capacidades dúcteis dos materiais S700MC e S960Q. Neste trabalho foi utilizado os dados do aço estrutural S960Q e suas propriedades encontram-se na tabela seguinte, Tab 1.

Tabela 1 – Propriedades do Material S960Q

Propriedades do Material	S960Q
Módulo de Young (N/mm ²)	214000
Tensão de Escoamento (N/mm ²)	1010
Limite de resistência à tração (N/mm ²)	1050
Deformação no limite de resistência à tração (%)	5,2
Deformação na fratura (%)	13,2

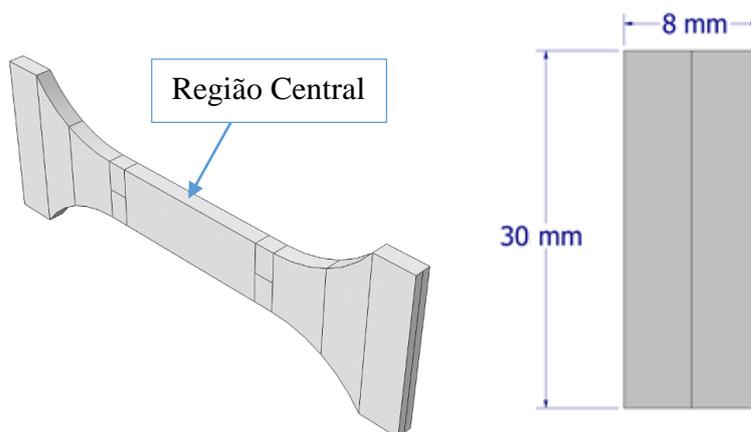
3.2 Modelo no Abaqus®

Constrói-se então o modelo para simulação em elementos finitos no *software Abaqus*®.

Os modelos são construídos tanto de forma dinâmica quanto de forma estática. De forma que possa ser possível comparar e avaliar se há diferenças que podem ser causadas entre os dois métodos. Nos resultados serão apresentados ambos os casos.

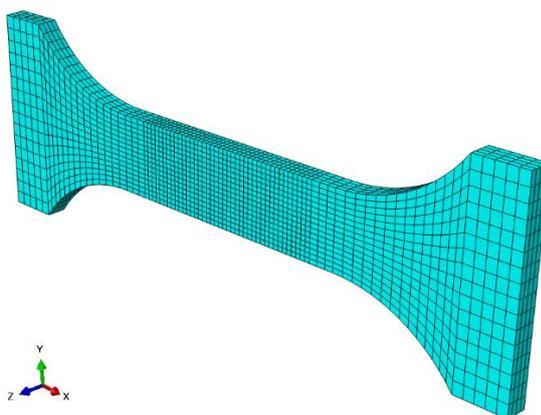
A imagem abaixo, Fig. 5, apresenta a geometria do corpo de prova, construído na simulação. Onde o comprimento da região central, região uniforme, é de 80 mm.

Figura 5 – Geometria do corpo de prova da simulação



O corpo de prova para simulação do ensaio de tração recebe a seguinte malha, Fig. 6. Para construção da malha busca-se que os elementos da região central sejam regulares, tendo a medida das suas arestas como sendo 0,2 mm. Importante salientar que a regularidade e o tamanho da malha impactam fortemente no custo computacional em caso de simulação dinâmica, conforme apresentado nos resultados. O elemento utilizado na malha é o C3D8R, elemento sólido hexaédrico de 8 nós e de integração reduzida.

Figura 6 – Representação da malha de elementos finitos



As condições de contorno para o modelo são definidas de forma a mimetizar as condições reais do ensaio. Tendo assim, em relação à figura 6, a superfície final lateral esquerda completamente fixada em todos os graus de liberdade, enquanto que a superfície lateral direita fica acoplada a um ponto de referência e este tem todos seus graus de liberdade, como também

totalmente fixados, menos a translação no eixo x , onde será aplicado o carregamento prescrito de deslocamento.

O carregamento é aplicado na forma de deslocamento prescrito no ponto de referência da geometria, na direção do eixo x , no sentido de tração. A duração do período de carregamento é definido como 200 s. O deslocamento aplicado é aquele suficiente para ultrapassar a região de ruptura do material.

3.3 Regra para tensão-deformação pós-estricção

Novamente, seguindo Yang et al. (2020), o passo seguinte do procedimento é então, a modelagem do comportamento plástico do material.

A partir da curva experimental, tensão-deformação de engenharia, obtém-se a curva de tensão-deformação verdadeira do material. Separa-se a curva em duas regiões, pré-estricção e pós-estricção. Na região de pré-estricção a conversão pode ser obtida facilmente através das bastante conhecidas equações, Eq. (4) e (5). Tais equações partem de duas hipóteses, a consideração de que o volume permanece constante e a de que a deformação na região central do corpo de prova é distribuída uniformemente.

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (4)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (5)$$

Aqui σ_e é a tensão de engenharia, ε_e é a deformação de engenharia, σ_t é a tensão verdadeira e ε_t é a deformação verdadeira. No entanto, para a deformação plástica que se encontra na região pós-estricção da curva, as mesmas equações não podem ser utilizadas, visto que a diminuição da secção cria uma região de deformações que deixam de estar distribuídas uniformemente. Dito isto, aplica-se o modelo de Ling (1996) para descrever o comportamento da tensão verdadeira. Este é formado da combinação de duas funções, uma linear e uma exponencial, conforme mostrado na equação 6 abaixo.

$$\sigma_t = W(a\varepsilon_t + b) + (1 - W)(K\varepsilon_t^n) \quad (6)$$

Na equação acima, Eq. 6, W é o parâmetro de ajuste da curva. Onde um valor próximo a 1 traria a curva para próximo de uma equação linear, enquanto que um valor mais próximo a 0 traria o modelo para um comportamento mais exponencial. No entanto, como tal parâmetro não tem significado físico, seu valor não precisa estar dentro do intervalo estabelecido, como por exemplo entre 0 e 1, podendo inclusive assumir valores negativos, conforme estudado por Yang et al. (2020).

Já os outros parâmetros da equação podem ser determinados a partir da condição de continuidade, Eq. 7, e da condição de início de estricção, Eq. 8.

$$\sigma_t|_{\varepsilon_t=\varepsilon_{t,u}} = \sigma_{t,u} \quad (7)$$

$$\left. \frac{d\sigma_t}{d\varepsilon_t} \right|_{\varepsilon_t=\varepsilon_{t,u}} = \sigma_{t,u} \quad (8)$$

Onde $\sigma_{t,u}$ e $\varepsilon_{t,u}$ são, respectivamente, a tensão verdadeira e a deformação verdadeira no início de estrição. Os parâmetros da equação assumem assim os valores de: $a = \sigma_{t,u}$, $n = \varepsilon_{t,u}$, $b = a(1 - n)$, $K = a/n^n$.

Os valores para início de estrição são obtidos do ensaio de tração em forma de engenharia e podem ser convertidos para valores reais. A tabela 2 a seguir apresenta os parâmetros então obtidos.

Tabela 2 – Dados e parâmetros do ajuste de curva pós-estricção

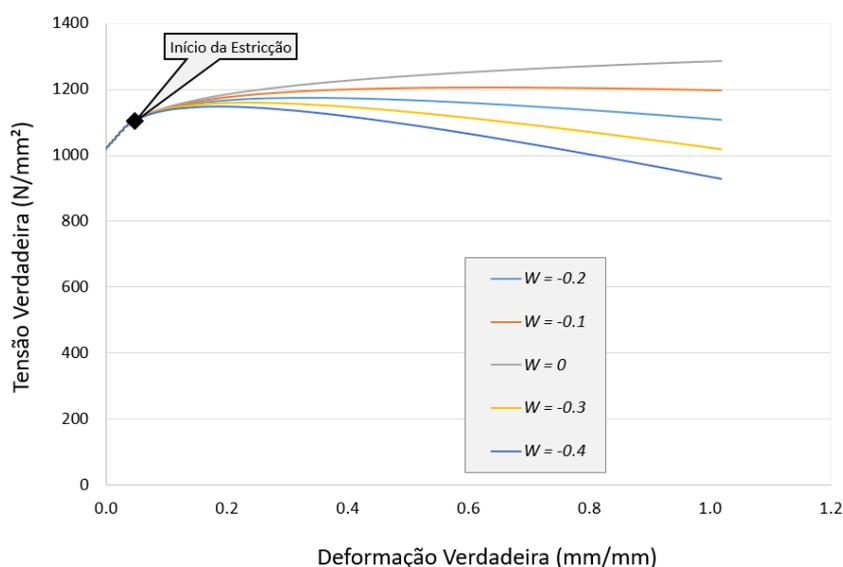
Material	$\sigma_{t,u}$	$\varepsilon_{t,u}$	a	b	K	n
S960Q	1104,6	0,051	1104,6	1048,6	1284,9	0,051

3.4 Calibração da relação tensão-deformação pós-estricção

Assim, parte-se para a calibração. O método utilizado para calibrar o modelo de Ling (1996), que irá descrever o comportamento pós-estricção do material é baseado na simulação numérica através do *software* Abaqus®. Primeiramente adiciona-se os parâmetros materiais lineares elásticos à simulação bem como os dados materiais de plasticidade pré-estricção. Este comportamento plástico é inserido na forma de pontos de uma curva no *software*, formato tabular, pontos estes que foram obtidos experimentalmente como valores de engenharia e convertidos em valores reais. Na sequência adiciona-se também de forma tabular os pontos que descrevem a curva pós-estricção, assim inicia-se propriamente o ajuste do modelo, pois são realizadas diversas simulações, cada qual com curvas com valores do parâmetro W diferentes.

Extrai-se então ao final de cada simulação a curva correspondente de tensão-deformação de engenharia. Para tal utiliza-se o valor de força no ponto de referência e avalia-se a mudança de comprimento na região central. Cada curva extraída é comparada à curva equivalente experimental, de forma a obter-se aquela que melhor representa seu comportamento. Figura 7 abaixo representa o comportamento plástico do material para diferentes valores de W . As curvas relativas ao parâmetro W que mais aproximou os valores do ensaio estão expressas na seção de resultados.

Figura 7 – Curvas do comportamento plástico para diferentes valores do parâmetro W



3.5 Modelos de dano dúctil

A próxima etapa é a modelagem de dano, a qual exige a definição da iniciação de dano e a definição da regra de evolução de dano.

3.5.1 Critério de início de dano

Para prever o início de dano o critério utilizado é o critério dúctil, segundo o *software* Abaqus[®] critério este que define a deformação plástica equivalente (PEEQ) de início de dano ($\bar{\epsilon}_D^{pl}$) como uma função da triaxialidade (η) e da taxa de deformação plástica ($\dot{\epsilon}^{pl}$). E o modelo utilizado para representar tal critério é o de Rice-Tracey (1969), descrito na equação 9 abaixo. Tal modelo não considera os efeitos da taxa de deformação plástica na iniciação de dano.

$$\bar{\epsilon}_D^{pl} = \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot \eta) \quad (9)$$

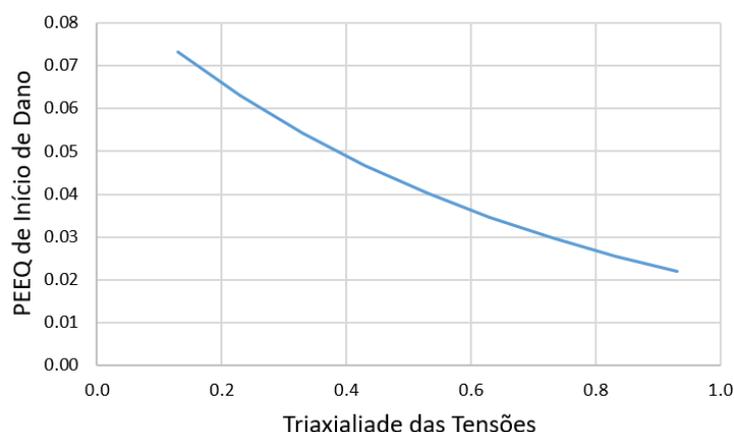
Neste modelo existem dois parâmetros materiais a serem definidos, α e β . Segundo o artigo de Rice-Tracey (1969), β deve ser considerado como 1,5 para as situações deste trabalho, enquanto que α pode ser obtido com base nos resultados da simulação do ensaio com o modelo que melhor se adequou.

Ao manipular a equação 9 do modelo é possível obter o parâmetro α como função da deformação plástica acumulada de início de dano e da sua respectiva triaxialidade, como mostrado a seguir. Faz-se aqui a consideração de que o início de dano é coincidente com o início da estricção, logo pode-se considerar da simulação o valor de deformação plástica acumulada de 0,052, que representa o momento de início de dano. Sabe-se ainda que a triaxialidade para o caso de ensaio de tração na região central assume o valor de 1/3. Tais considerações levam à equação seguinte, Eq. (10):

$$\alpha = \frac{\bar{\epsilon}_n^{pl}}{\exp(-1,5 \cdot \eta)} = 0,089 \quad (10)$$

Fica descrita então a deformação equivalente de início de dano ($\bar{\epsilon}_D^{pl}$) com função da triaxialidade e a figura 9 abaixo ilustra seu comportamento.

Figura 8 – Comportamento do valor de PEEQ de início de dano em função da triaxialidade



3.5.2 Estimar curva de tensão sem dano

Inicia-se aqui a descrição do método para descrever a regra de evolução do dano, sendo o primeiro passo a descrição das tensões não danificadas.

O método aqui utilizado para estimar quais seriam as tensões em uma situação ideal em que não ocorresse danificação é a calibração da relação do modelo de Ling (1996). Inicialmente é preciso gerar o equacionamento que determine essas tensões para posteriormente realizar o ajuste.

De forma a chegar no equacionamento propõe-se algumas hipóteses. Primeira, assume-se que o volume dos elementos na região central é constante. Logo, obtém-se a equação 11:

$$A_{ele0} \cdot L_{ele0} = A_{ele} \cdot L_{ele} \rightarrow \frac{A_{ele0}}{A_{ele}} = \frac{L_{ele}}{L_{ele0}} \quad (11)$$

A_{ele0} e L_{ele0} são a área original e o comprimento original de elementos centrais, enquanto que A_{ele} e L_{ele} são a área deformada e comprimento deformado desses mesmos elementos centrais. Faz-se também uma manipulação na equação da deformação axial dos elementos centrais de forma a isolar o alongamento, Eq. (12):

$$\varepsilon_{elet} = \int_{L_{ele0}}^{L_{ele}} \frac{dL_{ele}}{L_{ele}} = \ln L_{ele} - \ln L_{ele0} = \ln \left(\frac{L_{ele}}{L_{ele0}} \right) \rightarrow \frac{L_{ele}}{L_{ele0}} = \exp(\varepsilon_{elet}) \quad (12)$$

A hipótese seguinte diz que a mesma área original na secção de estrição vai resistir à mesma força axial em tração em todo decorrer do carregamento de tração. E como toda a secção central do corpo possui o mesmo tamanho de elemento a equação 13 seguinte pode ser obtida.

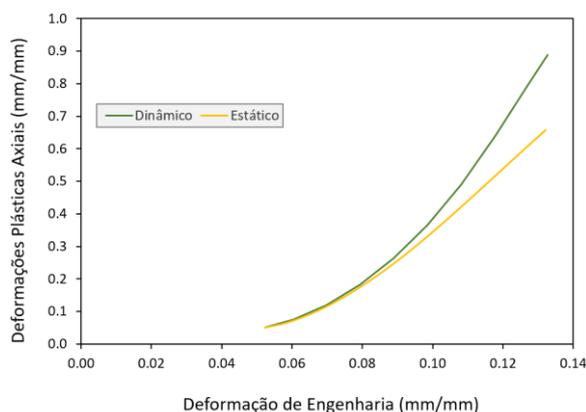
$$\frac{F_{ele}}{A_{ele0}} = \frac{F}{A_0} = \sigma_e \quad (13)$$

Onde, F_{ele} é a força axial resistida por um elemento central e A_{ele0} é a área original deste elemento. F representa a força axial resistida pela secção da região de estrição, e A_0 representa a área original desta mesma secção. Então, utilizando a equação 13 e equação 14 chega-se à seguinte equação, Eq. (14), para a tensão sem dano dos elementos centrais σ_{elet} :

$$\sigma_{elet} = \frac{F_{ele}}{A_{ele}} = \frac{F_{ele}}{A_{ele0}} \cdot \frac{A_{ele0}}{A_{ele}} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{L_{ele}}{L_{ele0}} = \sigma_e \cdot \exp(\varepsilon_{elet}) \quad (14)$$

A figura seguinte, Fig. 9, representa o comportamento das deformações da simulação do ensaio de tração, deformações plásticas axiais avaliadas nos elementos centrais versus deformação de engenharia, calculada conforme já apresentado.

Figura 9 – Comportamento da deformação plástica axial em relação à deformação de engenharia



O gráfico apresenta a diferença obtida entre as simulações dinâmicas e as simulações estáticas. Apesar de apresentar uma diferença significativa para a faixa de grandes deformações, os resultados finais não apresentaram a mesma diferença, como pode ser visto na seção dos resultados. Isto se explica pois este gráfico aqui representa apenas os elementos centrais.

Tal gráfico é utilizado para cálculo das tensões sem dano ao longo de todo o processo de tensão-deformação, visto que utiliza-se a deformação plástica axial para seu cálculo e a relação com a deformação de engenharia fica evidenciada, permitindo-se saber qual o estado da deformação plástica axial na curva de tensão-deformação de engenharia.

Através dos resultados obtidos para tensão não danificada faz-se o ajuste do modelo de Ling (1996) para definir qual valor de W melhor define a curva. O valor encontrado foi de 0,8 e na seção de resultado é possível observar o gráfico de seu ajuste.

3.5.3 Definição da regra de evolução do dano

A regra de evolução de dano é inserida de forma tabular no *software* Abaqus®, através dos dados da variável de dano e em função do deslocamento efetivo plástico. Dado a equação 3, manipula-se tal equação de forma a se obter a equação seguinte, Eq. (15), em que a variável de dano fica em função das expressões já ajustadas para tensão danificada, como figura 7, e tensão não danificada, figura 12.

$$D_i = 1 - \frac{\sigma_i}{\bar{\sigma}_i} \quad (15)$$

Faltando então determinar os valores correspondentes a D_i de deslocamento efetivo plástico (\bar{u}_i^{pl}). Segundo o manual do Abaqus® a equação que o define é a seguinte, Eq. (16):

$$\bar{u}_i^{pl} = L_{char} \cdot (\bar{\epsilon}_i^{pl} - \bar{\epsilon}_D^{pl}) \quad (16)$$

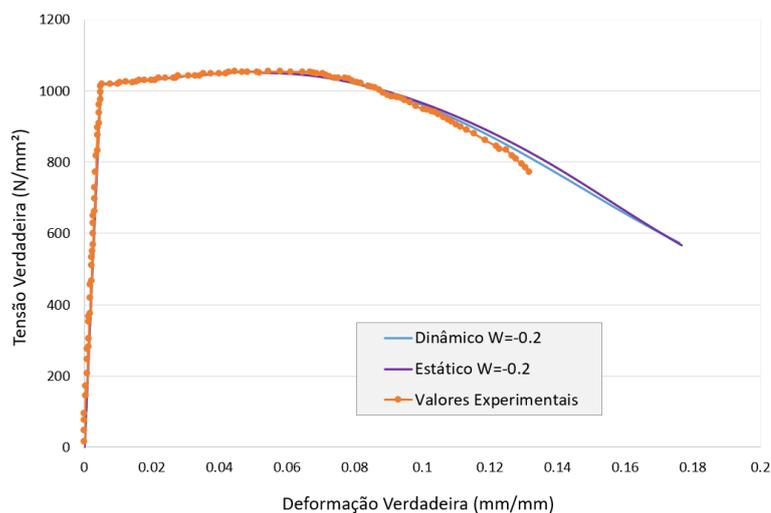
Onde L_{char} é o comprimento característico de elemento. Em que segundo a literatura, o elemento C3D8R tem comprimento característico considerado igual ao comprimento da aresta do elemento. E $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ é a deformação equivalente de início de dano, como já comentado e descrito na figura 8, enquanto que $\bar{\epsilon}_i^{pl}$ é a própria deformação plástica acumulada.

Por fim é necessário definir qual o valor da variável de dano que representa o dano crítico, D_{cr} , este valor da variável de dano é utilizado para definir quando irá acontecer a remoção do elemento danificado na simulação. D_{cr} é o calculado pela a equação que define a variável de dano, Eq. (15), nos pontos de tensão danificada e não danificada correspondente ao ponto de deformação plástica acumulada onde ocorre a fratura na tensão de engenharia.

4. RESULTADOS

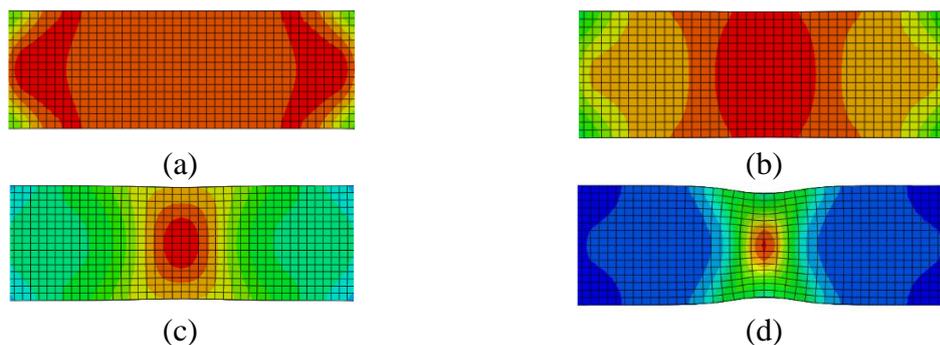
Os primeiros resultados são aqueles referentes ao ajuste de curva de tensão-deformação de engenharia retirada da simulação para diferentes valores do parâmetro W , ainda na fase de simulação sem consideração de dano, Eq. (6). Conforme é possível observar na figura 10 abaixo, a curva que melhor representou a curva do ensaio experimental de tração, retirado de Feldmann et al. (2016), RUOSTE (Rules on High Strenght Steel), foi aquela em que W assume o valor de -0.2, tanto para simulação dinâmica quanto estática.

Figura 10 – Comportamento das simulações para Tensão de Engenharia x Deformação de Engenharia



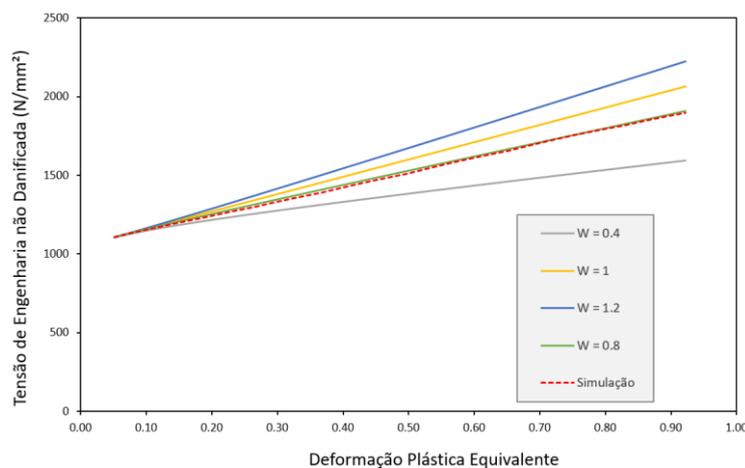
Para tal simulação a imagem abaixo, figura 11, ilustra o comportamento da região central do corpo em relação às suas deformações plásticas equivalentes e em qual estágio de deformação de engenharia o corpo se encontra. É possível reparar que as deformações plásticas ficam localizadas na parte central do corpo de prova à medida que o carregamento avança.

Figura 11 – Variação das deformações plásticas equivalentes durante o carregamento



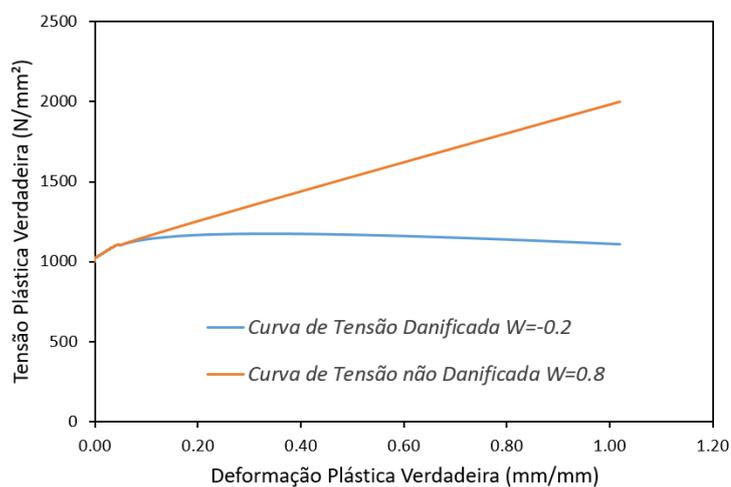
Quanto ao valor que melhor ajustou da equação de tensão sem dano, Eq. (6), a figura 12 abaixo contém o gráfico do comportamento destas tensões, obtidas da simulação, igual para estático e dinâmico, e as curvas com diferentes valores para W . O gráfico deixa claro que a curva cujo valor de W melhor representou o comportamento dos valores calculados de tensões se dano foi aquele de 0,8.

Figura 12 – Ajuste do modelo para tensões não danificadas



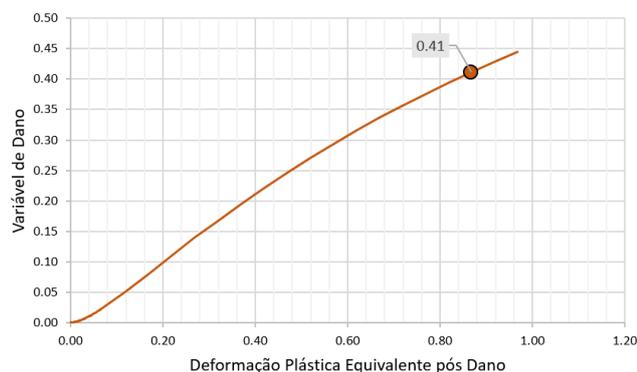
Na figura seguinte, Fig. 13, é possível observar a diferença nas curva de tensão sem dano e com dano.

Figura 13 – Comparação das curvas de tensão com dano e sem dano



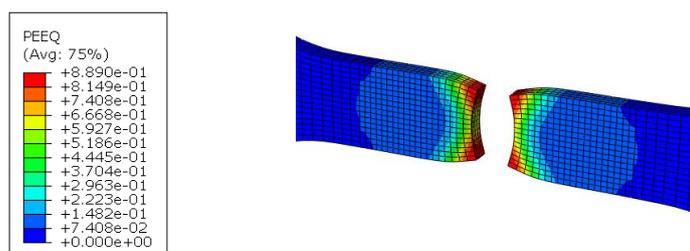
Tal diferença faz parte do equacionamento presente na Eq. (15), que faz o cálculo de D_i e que tem seu desenvolvimento ao longo da simulação representado na figura abaixo, Fig. 14. No gráfico D_i está colocando em função da deformação plástica acumulada após início de dano, ou seja, o valor 0 representa a deformação plástica equivalente onde o dano é iniciado. O valor destacado de 0,41 é aquele em que se encontra o valor de dano crítico.

Figura 14 – Regra de evolução de dano obtida



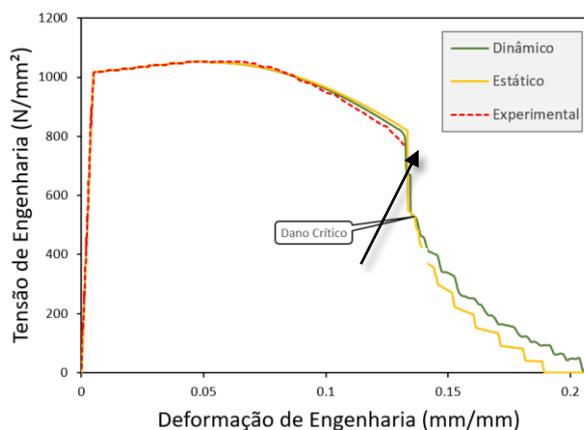
Tendo os valores de dano tabelados, é possível por fim ser feita a simulação com regras de início e evolução de dano aplicadas e observar os resultados. As figuras 15(a) e 15(b) a seguir apresentam o comportamento desta simulação em termos de deformação plástica equivalente e os níveis de degradação dos elementos.

Figura 15 – Representação do comportamento final da simulação



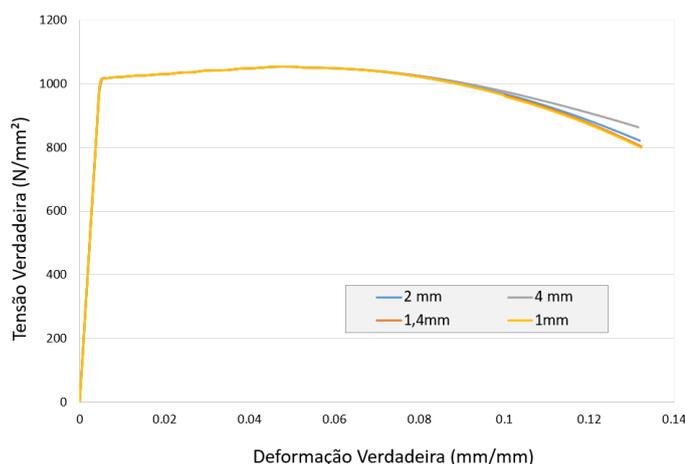
Por fim obtém-se o resultado que conclui a calibração da modelagem para representação do ensaio de tração, o resultado de curva de tensão-deformação de engenharia. A imagem seguinte, Fig. 16. Nela é possível observar a completa representação do ensaio de tração na simulação. As oscilações após atingido o valor de deformação de engenharia de início de fratura, aproximadamente 13,2%, representam a remoção progressiva dos elementos que atingiram dano crítico e conseqüente perda de resistência do material.

Figura 16 – Curvas finais obtidas para representação do ensaio de tração



Através da avaliação do resultado de tensão-deformação de engenharia foi feita a determinação do tamanho dos elementos a serem utilizados na malha de elementos finitos. Conforme figura 17 abaixo, ficou definido 2 mm como melhor opção pois está dentro dos resultados de convergência mas possui um custo computacional muito menor que as malhas de 1,4 mm e 1 mm.

Figura 17 – Comparação dos resultados com diferentes tamanhos de elementos



5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a calibração de um modelo de dano dúctil. Durante este trabalho foi possível encontrar, a partir de dados experimentais de ensaio de tração, uma curva do modelo de Ling (1996) que ajusta o comportamento das tensões pós-estriction do corpo de prova. Este ajuste foi feito com o uso do *software* comercial Abaqus, onde o desenvolvimento de uma malha de elementos finitos adequada foi exigido, visto que se não for refinada o suficiente os resultados são afetados, conforme figura 17.

Tendo o comportamento plástico descrito na simulação, o próximo passo foi conseguir descrever como o dano se comporta no caso em questão, quando inicia e a regra que descreve a evolução deste dano. Para avaliação do ponto de início foi utilizado o modelo de Rice-Tracey (1969). Enquanto que a regra de evolução do dano foi baseada na diferença entre as tensões com dano e tensões sem dano. As tensões sem dano foram definidas a partir dos valores do ensaio através de algumas hipóteses, e seu comportamento modelado novamente a partir do modelo de Ling (1996) onde foi possível encontrar um ajuste que representa corretamente as tensões. Desta forma ficou descrita a regra de evolução de dano de forma que inserida na simulação foi possível analisar o comportamento do dano nos elementos durante o processo e representar o momento da fratura através da definição do dano crítico, valor definido a partir da observação dos ensaios experimentais.

A simulação computacional foi elaborada tanto de forma dinâmica quanto estática, havendo uma leve alteração entre os resultados, conforme pode ser visto na figura 16, no entanto esperava-se que o custo computacional fosse significativamente menor para o caso estático, o que não aconteceu.

Em relação à sua motivação, extrai-se deste trabalho a possibilidade da metodologia utilizada para calibração do modelo de dano dúctil poder servir de base para a calibração de outros modelos de dano ou de inspiração para outras formas de calibração.

Observa-se por fim que este estudo teve um impacto significativo na obtenção de conhecimento para o caso de ser dado prosseguimento ao trabalho que motiva este, o de conformação eletromagnética.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaqus Analysis User's Manual, Version 6.8

Fei Yang, Milan Veljkovic, Yuqing Liu, Ductile damage model calibration for high-strength structural steels, **Construction and Building Materials**, Volume 263, 2020, 120632, ISSN 0950-0618, Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120632>>.

G. R. Johnson and W. H. Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. **In International Symposium on Ballistics**, pages 541-547, The Hague, The Netherlands, 1983.

Gordon R. Johnson, William H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, **Engineering Fracture Mechanics**, Volume 21, Issue 1, 1985, Pages 31-48, ISSN 0013-7944, Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0013-7944\(85\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0013-7944(85)90052-9)>.

J.R. Rice, D.M. Tracey, On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields*, **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, Volume 17, Issue 3, 1969, Pages 201-217, ISSN 0022-5096. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0022-5096\(69\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(69)90033-7)>.

M. Feldmann, N. Schillo, S. Schaffrath, et al., Rules on high strength steel, **Final report**, RFSR-CT-2012-00036, 2016. Disponível em: <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/515285b0-c820-11e6-a6db-01aa75ed71a1>>

Y. Ling, Uniaxial true stress-strain after necking, *AMP J. Technol.* 5 (1996) 37–48.