

Modelagem computacional do small punch test utilizando FEM



<https://doi.org/10.56238/interdiinovationscrese-066>

E-mail: manuel.esteves@untrm.edu.pe

Wilfredo Javier Valdivia Rojas

MsC., Universidade Cesar Vallejo – UCV - Huaraz, Peru
E-mail: wvaldiviaro@ucvvirtual.edu.pe

Jesús Johan Huaney Carranza

Mag., Universidade Cesar Vallejo – UCV - Huaraz, Peru
E-mail: jehuaneyca@ucvvirtual.edu.pe

Heber Elcano Chanducas Tantaleán

MsC., Universidade Cesar Vallejo – UCV - Huaraz, Peru
E-mail: hchanducasta@ucvvirtual.edu.pe

Javier Alejandro Manrique Catalán

Mag., Universidade Tecnológica do Peru – UTP, Peru
E-mail: c24432@utp.edu.pe

Luis Alberto Rabanal Ramirez

Dr., Univerdade Feral Fluminense– ICT-UFF- Rio das Ostras / RJ, Brasil.
E-mail: lramirez@id.uff.br

RESUMO

Este trabalho utiliza a técnica de caracterização de materiais conhecida na bibliografia como "Small Punch Test" (SPT), considerada não destrutiva e de baixo custo, devido ao fato de que, para sua aplicação, são utilizadas pequenas amostras de material, comparadas com outras. tamanhos de amostras utilizados em outros ensaios, tanto a técnica quanto o modelo computacional são apresentados em conjunto devido a sua inter-relação. Os resultados das simulações estão altamente correlacionados com os publicados. Após o ponto e calibração do modelo, são apresentados resultados otimizados da caracterização do aço API 5L-X70 utilizado em gasodutos, objetivo principal deste trabalho.

Sandro Pereira Vilela

Dr.
E-mail: sandro.vilela@gmail.com

Cláudio Márcio de Freitas da Silva

Doutorado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica– ITA - São José dos Campos/SP - Brasil.
E-mail: claudiocmfs@ita.br

Yovana Torres Gonzales

Dra., Universidade Continental, Huancayo - Peru
E-mail: ytorresg@continental.edu.pe

Manuel Emiliano Esteves Pairazamán

Dr., Universidade Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza – UNTRM - Amazonas, Peru

Palavras-chave: Teste de Punção Pequena, Elementos Finitos, Caracterização de metais.

1 INTRODUÇÃO

Os tubos utilizados no transporte de petróleo através das diferentes regiões do Peru estão sujeitos a condições operacionais que introduzem fenômenos temporários de degradação, com grandes variações de temperatura, umidade, ambientes corrosivos, estados de alta tensão etc. Portanto, opinar sobre o estado da vida útil dessas e de peças críticas (como áreas de solda) não é uma tarefa fácil, uma vez que não existem parâmetros diretos que caracterizem o nível de degradação. Às vezes, por falta de informação, esses dutos são substituídos prematuramente pelo risco que representam.

As técnicas de caracterização de materiais são classificadas em ensaios destrutivos e não destrutivos. Normalmente, em ensaios destrutivos, são utilizadas amostras dimensionalmente grandes



de material, que após o ensaio são inutilizáveis. No caso dessas amostras, há dificuldade em realizar a caracterização mecânica de pequenas regiões, implicando no desperdício do material.

Por outro lado, existem ensaios não destrutivos, estes ensaios são realizados em um objeto sem causar qualquer tipo de alteração, implicando dano imperceptível ou nenhum. Exemplos de ensaios não destrutivos são: penetrantes líquidos, partículas magnéticas, ensaios ultrassônicos, radiografia, correntes parasitas, infravermelho térmico e ensaios de emissões acústicas (Bray e McBride, 1992).

Além dos ensaios não destrutivos, a modelagem matemática computacional permite simular o processo mecânico com certos graus de liberdade, em especial, para simular a caracterização de materiais com alto grau de fidelidade, também é possível repetir o processo várias vezes, quantas vezes forem necessárias, a fim de analisar fases com maior riqueza de detalhes. maior controle do que se o teste fosse realizado sem modelagem. Essa melhor compreensão reduz o chamado "fator de ignorância" e, assim, permite um menor "fator de segurança" sem sacrificar a confiabilidade do produto (Bray e McBride, 1992). Ressalta-se, ainda, que os ensaios não destrutivos, além de reduzirem custos, possibilitam eliminar os perigos inerentes aos ensaios destrutivos.

Para alcançar os objetivos propostos, este trabalho foi organizado da seguinte forma: na seção 1 é feita uma introdução ao tema, bem como ao objetivo do trabalho, na seção 2 é apresentado o referencial teórico, é feita uma revisão dos fundamentos teóricos relacionados a esta tese. A seção 3 apresenta a teoria dos Elementos Finitos juntamente com as particularidades da implementação do Small Punch Test. A seção 4 apresenta os resultados da implementação do modelo Small Punch Test no software ABAQUS© 2019. A seção 5 apresenta as conclusões e trabalhos futuros indicando possíveis linhas de pesquisa para dar continuidade a este trabalho e, finalmente, na seção 6 é apresentada a Bibliografia.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os testes mecânicos convencionais requerem um volume relativamente grande de material a ser testado, e removê-lo dos componentes operacionais pode afetar a integridade do sistema. Nessas situações, ensaios mecânicos baseados em técnicas de ensaios de pequenas amostras são considerados soluções eficientes para caracterizar as propriedades mecânicas de componentes. O aspecto mais importante para a criação de uma amostra em miniatura é o tamanho do comprimento de referência equivalente (EGL), que deve ser alto o suficiente em relação às características metalúrgicas do material (por exemplo, tamanho de grão, Fig. 1) para que as propriedades obtidas sejam representativas do material e não apenas as propriedades da amostra em questão, mas também permitam o fácil reparo do componente.

O conjunto de testes em miniatura inclui, por exemplo: o teste de fluência de impressão (EIC) (Chu e Lee, 1977), o teste mini "Charpy" (Kurishita, 1994), o teste de indentação instrumentado (Byun

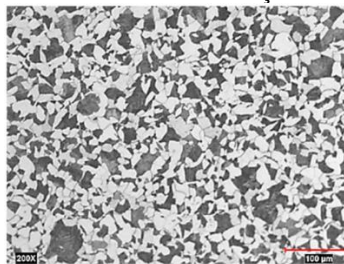


e Hong, 1977), o teste de "Small Ring" (ESR) (Hyde et. al, 2009), o ensaio de tração em corpos de prova miniaturizados (Kumar et. al. 2014) e o teste de punção esférica conhecido como Small Punch Test (SPT), etc. Este último é o objeto de estudo deste trabalho.

2.1 TESTE DE PUNÇÃO PEQUENA (TCP)

A terapia por pressão por pressão subatmosférica é uma técnica semidestrutiva utilizada para avaliar a resistência mecânica de materiais. Seguindo as recomendações das normas (ASTM 3205, 2020), BS EN 10371:2021 (EN 10371, 2021), geralmente envolve a aplicação de uma carga cíclica repetitiva a um pequeno disco (ou folha quadrada) de material, com um diâmetro de aproximadamente 8-10 mm e uma espessura de 0,5 mm, usando um dispositivo de teste especializado. A carga é aplicada por meio de um punch esférico com diâmetro de 1 mm que é pressionado contra o centro do disco. Essas pequenas amostras retiradas de componentes em serviço não apenas mantêm a integridade estrutural da peça intacta, ou pelo menos reparável, mas também permitem a localização de zonas de componentes críticos (áreas mais suscetíveis a tensões e danos).

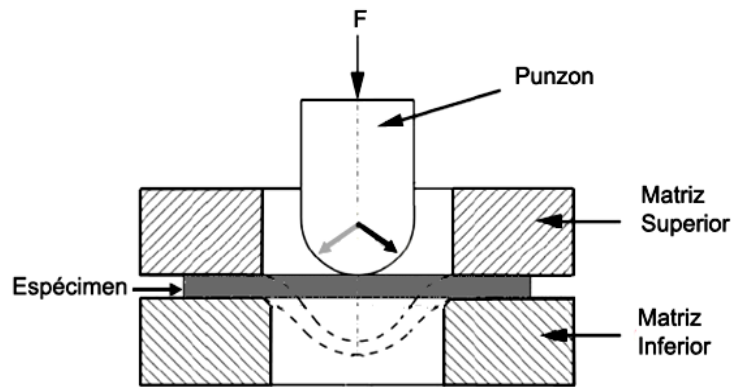
Gráfico 1. Microestrutura em aço API 5L X70.



O TCP é usado principalmente para avaliar a tenacidade à fratura e a resistência à fluência dos materiais, especialmente em situações em que as amostras disponíveis são limitadas ou quando uma avaliação rápida é necessária. Além disso, essa técnica também pode ser usada para avaliar a ductilidade, resistência à fadiga e resistência ao impacto de materiais. A TCS tem o potencial de calcular a maioria das propriedades mecânicas dos materiais (Hyde e Brett, 2009). A caracterização do comportamento mecânico de materiais estruturais, exceto por sua dureza, é por definição destrutiva. Para uma melhor descrição do teste a ser seguido, apresentamos os componentes do aparelho (Fig. 2) e suas principais características.



Gráfico 2. Componentes e sua disposição no aparelho SPT adaptado de (CWA 15627, 2008).



A Fig. 2 ilustra o processo de cisalhamento do punch (ferramenta de corte). O processo é causado pela pressão constante exercida pela ferramenta sobre a superfície a ser cortada (amostra, espécime). A separação ocorre quando a pressão excede a tensão máxima de cisalhamento do material. O punch geralmente tem uma cabeça hemisférica ou uma única esfera, neste último caso é mais fácil e prático substituir a esfera, caso sofra algum dano. Os espécimes, também chamados de espécimes são geralmente de dois tipos, discos de 10 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura (Torres e Nunes, 2021), sólidos retangulares geralmente de 10x10 mm² de seção e 0,5 mm de espessura. A maior diferença entre geometrias circulares e retangulares é a área de contato entre o espécime e as matrizes. A seção retangular tem uma área de contato maior, facilitando a fixação ao conjunto de teste SPT. As matrizes correspondem aos sólidos de fixação, é importante ressaltar que é importante considerar o atrito dos componentes em contato.

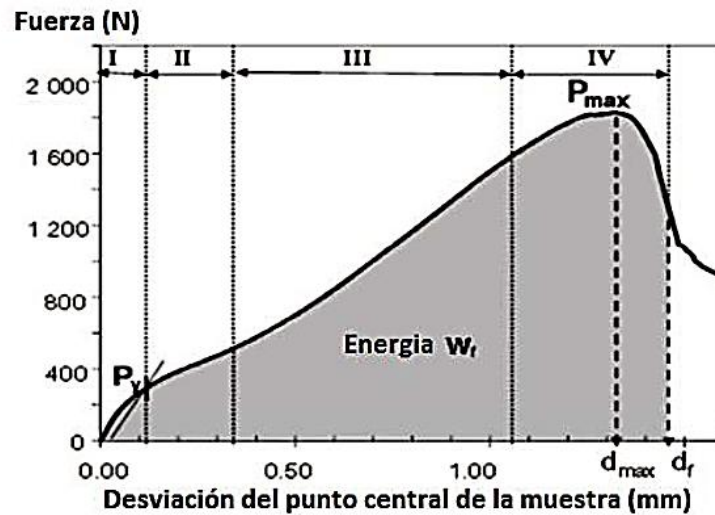
2.2 FORÇA VS DESLOCAMENTO

O TCP permite a determinação da curva de força vs deslocamento, a força é aquela que o punch aplica sobre um ponto central de uma pequena amostra, inicialmente é um ponto em que o punch chamado indenter se move até cruzar completamente a amostra. Os ensaios de TCP podem ser realizados em temperaturas ambiente e elevadas, avaliar a resistência mecânica em diferentes temperaturas é especialmente importante na indústria, onde os materiais podem ser expostos a diferentes condições de temperatura, ABAQUS torna possível criar estas condições de temperatura, a fim de obter propriedades de fratura e fluência elástico-plástico, mais realistas.

Geralmente, uma curva de deslocamento de força obtida a partir do TCP à temperatura ambiente pode ser dividida em quatro regiões (ver Fig. 3). A partir dessa curva, são calculadas propriedades mecânicas, tais como: resistência ao escoamento, limite de resistência, tenacidade à fratura e propriedades de fluência (sendo esta última a mais explorada). A TCS tem o potencial de calcular a maioria das propriedades mecânicas dos materiais (Hyde e Brett, 2009). A caracterização do comportamento mecânico de materiais estruturais, exceto por sua dureza, é por definição destrutiva.



Gráfico 3. Curva Força aplicada vs deslocamento do ponto central do corpo de prova.



A Fig. 3 ilustra a curva força-deslocamento obtida pelo TCP, nesta curva podem ser distinguidas quatro zonas diferentes: zona I deformação elástica, nesta zona observa-se uma ligeira influência no contato inicial do punch com o corpo de prova, zona II transição elastoplástica, em algumas partes desta zona especificamente aquelas que estão em contato com a periferia do punch, A zona III é o resultado da deformação plástica generalizada, a zona IV é caracterizada por instabilidade plástica e fratura.

Essa técnica tem aplicação prática em diferentes áreas, mas as indústrias petrolífera e nuclear são as que mais aproveitaram essa tecnologia e possibilitaram estudá-la e desenvolvê-la.

2.3 AÇO API 5L-X70

O aço API 5L-X70 é um tipo de aço de alta resistência utilizado na fabricação de tubos para a indústria de petróleo e gás. Este aço é caracterizado por sua alta resistência mecânica, o que o torna ideal para suportar altas pressões e temperaturas extremas.

A importância do aço API 5L-X70 reside em sua capacidade de garantir a segurança e a confiabilidade dos sistemas de tubulação utilizados na exploração e produção de petróleo e gás. Além disso, sua alta resistência à corrosão e ao impacto o tornam uma escolha confiável para projetos de infraestrutura crítica.

Os dutos utilizados no transporte de derivados de petróleo requerem materiais com uma combinação excepcional de propriedades mecânicas, incluindo alta resistência mecânica, tenacidade e resistência à fadiga. O aço API 5L X70 apresenta-se como uma das melhores opções, seu estudo e caracterização é o foco deste trabalho.

Os aços API, com características de alta resistência, aliados a boa soldabilidade, baixo nível de inclusões e boa qualidade superficial, são especificados pelo American Petroleum Institute (API) no caso do APISPEC 5L 2007. O principal guia para soldagem de tubos é uma norma API 1104, que



fornece os dados necessários para obter juntas soldadas de boa qualidade. As juntas nos tubos são soldadas no campo e apenas no lado externo. Como o tubo é fixo, a soldagem deve ser realizada em todas as posições, as juntas soldadas devem ser abordadas no âmbito da caracterização deste aço.

Para a classe API 5L, a composição química e os graus de resistência mecânica variam de API 5L A25 a API 5L X80. Nas designações constituídas pelas letras A ou X, os dois últimos algarismos especificam os valores-limite mínimos de caudal para o material em ksi. Assim, os aços API 5L X80 têm um valor de vazão mínima de 80 ksi (-550 MPa). De acordo com os requisitos dos tubos, os graus API-5L-A e B são usados em tubos de baixa pressão, enquanto os graus API-5L X42, X46, X52, X60 e X-70 são usados em tubos de alta pressão.

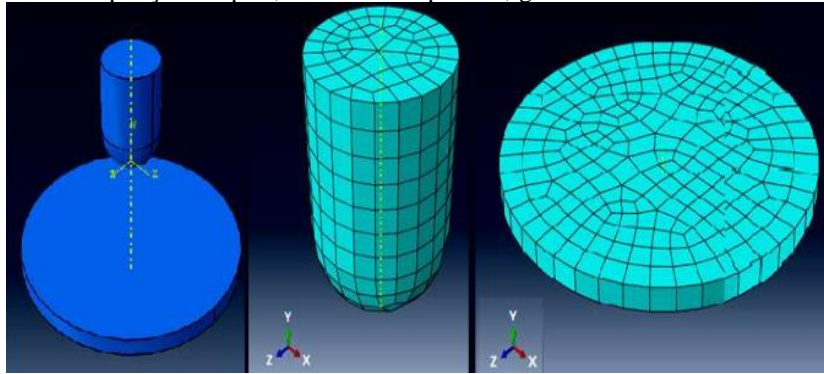
2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A simulação por MEF da técnica de caracterização "Small Punch Test" é importante porque permite simular as condições próximas às reais e melhorar a análise dos resultados, uma vez que é possível repetir o processo n vezes, escolher partes da simulação para realizar uma análise temporal mais detalhada. Além disso, o MEF pode ser usado para modelar o comportamento mecânico do material, testes virtuais podem ser realizados antes de testar amostras físicas, reduzindo o custo e o tempo de desenvolvimento de novos materiais.

Neste contexto, o MEF aparece como uma abordagem numérica que resolve equações diferenciais parciais aproximadamente. A partir disso, a ideia principal do WEF é a divisão do domínio do problema em regiões com geometria mais simples (ver figura 3). Essas geometrias podem ser triangulares, cúbicas, quadradas, entre outras, dependendo do tipo e dimensão do problema. As formas mais simples são conectadas por nós, e por este arranjo é possível obter uma solução aproximada. Isso é chamado de malha de elementos finitos, e o processo de fazer malhas é chamado de geração de malha. Cada componente é uma estrutura contínua, usando funções polinomiais em conjunto com operações matriciais, o comportamento contínuo de cada elemento é implementado em função das propriedades geométricas e das propriedades do material. As cargas podem ser aplicadas dentro de cada elemento (gravidade, dinâmica, térmica, etc.), seja na superfície do elemento ou em seus nós.



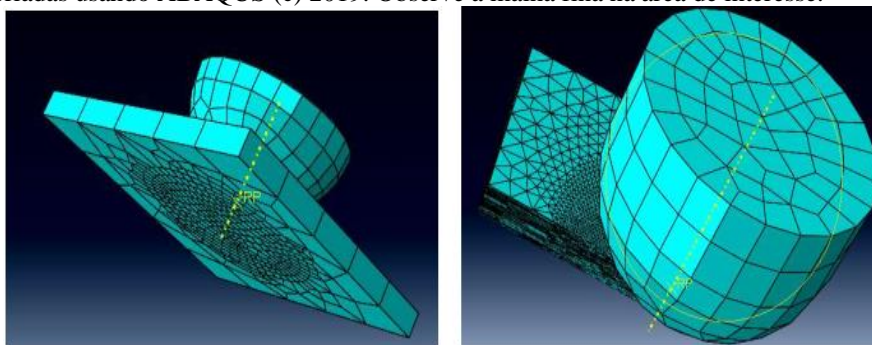
Gráfico 3. Ilustrando malha de punção simples, bem como espécime, gerado utilizando o software ABAQUS© 2019.



Os nós dos elementos são suas entidades governantes fundamentais, uma vez que é neles que o elemento se interconecta com outros elementos e onde as propriedades elásticas do elemento são finalmente estabelecidas, as condições de contorno são atribuídas e, finalmente, as forças (contato ou corpo) são determinadas. Os graus de liberdade dos nós são os movimentos independentes de rotação e translação que podem ocorrer. Cada nó pode ter no máximo três graus de liberdade de translação e três graus de rotação.

Uma vez que cada elemento dentro de uma estrutura tenha sido definido localmente na forma de uma matriz, os elementos são montados (amarrados) globalmente por seus nós comuns em uma matriz global do sistema. As cargas aplicadas e as condições de contorno são então especificadas e, através de operações matriciais, os valores de todos os graus desconhecidos de liberdade de deslocamento são determinados. Conhecendo os deslocamentos, as deformações e tensões pode-se calcular utilizando as equações da mecânica contínua e as leis constitutivas dos materiais.

Gráfico 4. Tipos de elementos finitos (a) modelo completo e (b) modelo simplificado, aproveitando a simetria do problema. Malhas criadas usando ABAQUS (c) 2019. Observe a malha fina na área de interesse.



Na MEF, a precisão do método depende de vários fatores presentes na malha, como o número de nós, tipo, tamanho e número de elementos. A solução tende a convergir para a solução exata à medida que a malha é refinada (exemplos na Figura 4), ou seja, quanto maior o número de elementos, maior a precisão dos resultados.



A análise realizada pelo MEF é dividida em três partes distintas, a saber: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Na primeira etapa, você precisa definir a geometria, o tipo de análise, a malha, as propriedades do material e as condições de contorno. No processamento ou análise, o tipo de análise desejado (usando equações lineares ou não-lineares, entre outras configurações) deve ser definido para obter os deslocamentos nodais. Na etapa de pós-processamento, são apresentados os resultados, como tensões, fluxo de calor, convergência, fatores de segurança, etc. Esta sequência de passos é seguida pela maioria dos softwares MEF, entre os mais conhecidos ABAQUS, ANSYS©©, FEMLAB © etc. A partir deste ponto, quando nos referimos ao software utilizado, estamos nos referindo ao ABAQUS©.

A modelagem FEM também é importante porque pode ajudar a identificar regiões críticas da amostra onde ocorrerão falhas durante o teste. Conhecendo essas regiões, é possível modificar a geometria da amostra ou ajustar as condições de ensaio para evitar falhas prematuras. Em geral, a modelagem por MEF é uma ferramenta valiosa para melhorar a eficiência e a precisão da técnica de caracterização por TCP.

3 IMPLANTAÇÃO DO SPT UTILIZANDO ABAQUS-FEM

3.1 CARACTERÍSTICAS DO SOFTWARE ABAQUS

O ABAQUS 2019 é um software de elementos finitos altamente adaptável que permite criar modelos com altíssima complexidade geométrica, sendo utilizado neste trabalho para implementar o modelo SPT e suas adaptações de forma para caracterizar o aço API 5L x70. Conseqüentemente, esses modelos podem ser testados e examinados quanto à acurácia, com a possibilidade de que seus parâmetros possam ser modificados de forma a otimizar os resultados.

Tabela 1. Unidades utilizadas no Software ABAQUS em comparação com unidades SI.

Magnitude	IS	Unidades em ABAQUS
Longitude	m	mm
Hora	s	s
Massa	kg	ton
Força	N	N
Pressão	Pa(N/m ²)	MPa (N/mm ²)
Velocidade	m/s	Mm/s
Energia	J	mJ

3.2 SISTEMAS UNITÁRIOS UTILIZADOS NA ABAQUS

Antes de começar a modelar o problema, é importante avisar sobre o sistema de unidade usado pelo software. Inúmeras propriedades e medidas foram utilizadas na implementação do modelo. A ABAQUS não trabalha com unidades específicas. Esta não é uma escolha feita pelo usuário, mas uma escolha de design de software. Portanto, o sistema de unidades deve ser consistente. Nesse caso, não foi utilizado o Sistema Internacional (SI) básico. Dois argumentos principais sustentam a decisão.

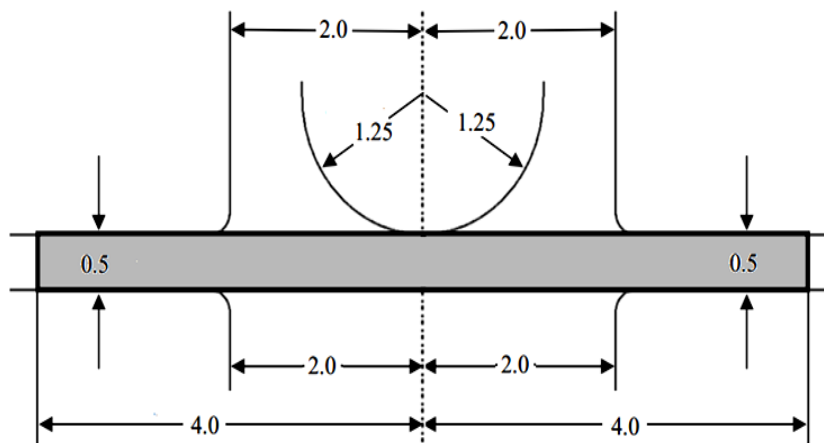


Inicialmente, não é adequado para medidas e, segundo, as unidades de medida não coincidem com as utilizadas pelo restante da literatura. Para tanto, utilizou-se uma variação com múltiplos e submúltiplos, conforme detalhado na Tabela 1.

3.3 MODELO BASE SPT

A seção transversal do modelo geométrico do TCP é mostrada na Figura 5. O modelo consiste em uma matriz superior e inferior, um soco e uma amostra. Este último é um disco circular fino com um diâmetro de 8 mm e uma espessura de 0,5 mm, enquanto o raio de punção é de 1,25 mm. Os diâmetros internos da matriz superior e inferior são todos de 4mm. Tanto a matriz superior quanto a matriz inferior têm um raio de curvatura de 0,2 mm.

Gráfico 5. Seção transversal do modelo SPT, todas as unidades em mm.



3.4 MÓDULOS ABAQUS

A resolução de um problema com qualquer software de elementos finitos passa por três fases. Cada fase com seus módulos correspondentes, conforme descrito abaixo:

1. Fase de pré-processamento: O pré-processamento consiste na definição do problema em si. É aqui que o modelo é introduzido no programa, tendo em conta as simplificações necessárias. Pertencem a esta fase os seguintes módulos:

Parte.- Este módulo define as geometrias e peças básicas que compõem o modelo. Isso pode ser feito no próprio editor da ABAQUS, embora também haja a possibilidade de importar geometrias de outros programas CAD no caso de geometrias mais complexas. Os tipos de peças que podem ser criadas são: deformáveis, rígidas discretas, rígidas analíticas ou eulerianas.

Propriedade.- Define os materiais das peças criadas (Fig. 6). Esses materiais são mapeados para seções, e as seções são mapeadas para geometrias criadas no módulo Peça.

Montagem.- O módulo "montagem" permite colocar as peças previamente definidas em suas posições relativas no espaço.



Passo.- Este módulo apresenta o tipo de análise a ser realizada. Ele também permite que você defina quanto tempo a simulação vai durar.

Interação.- após a colocação das diferentes peças no espaço, é necessário estabelecer as relações entre elas, desde a união das geometrias até o estabelecimento do tipo de contato entre as peças (Fig. 7).

Gráfico 6. Ilustrada a definição das propriedades da amostra.

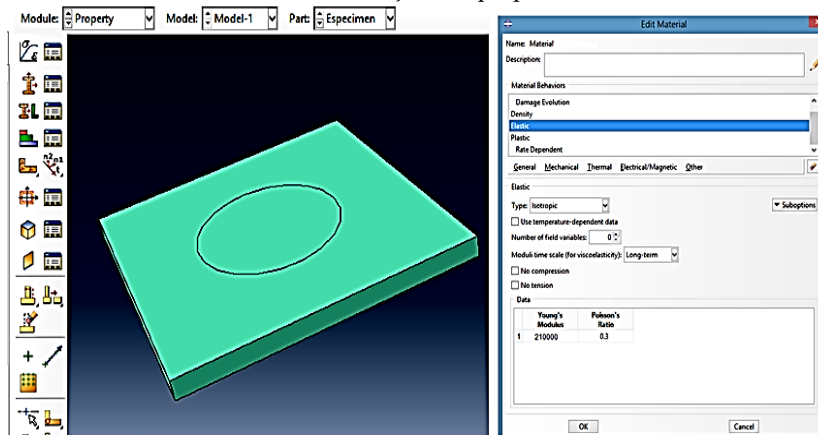
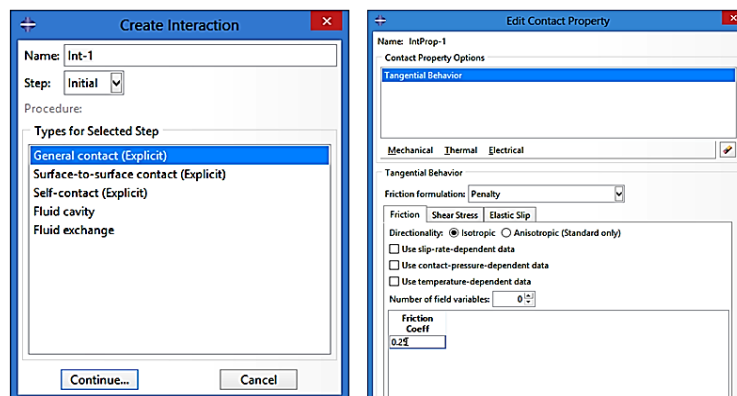
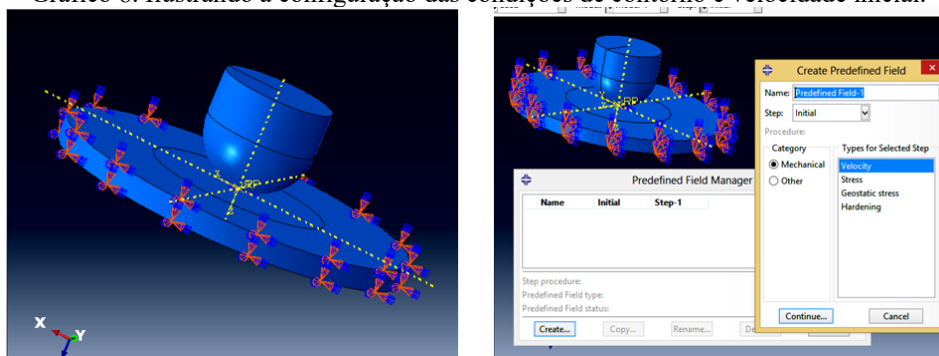


Gráfico 7. Ilustrando a escolha do tipo de contato e atrito.



Carga.- Permite inserir as cargas e condições de contorno das peças, bem como as restrições de movimentos e velocidades iniciais (Fig. 8).

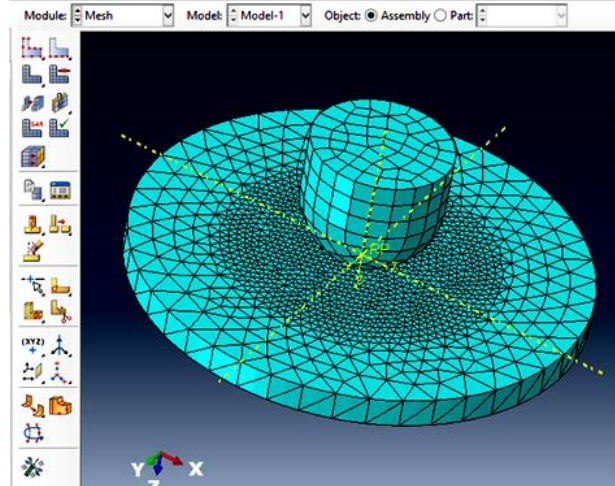
Gráfico 8. Ilustrando a configuração das condições de contorno e velocidade inicial.





Malha.- Gera as malhas que discretizam o modelo. Uma malha mais refinada conterá um maior número de elementos e, portanto, os resultados serão mais precisos. No entanto, o tempo de cálculo aumentará consideravelmente, tornando necessário equilibrar a resolução da malha em relação à margem de erro tolerável e ao tempo de computação disponível (Fig. 9).

Gráfico 9. Ilustrando a malha mais densa na área de ruptura.



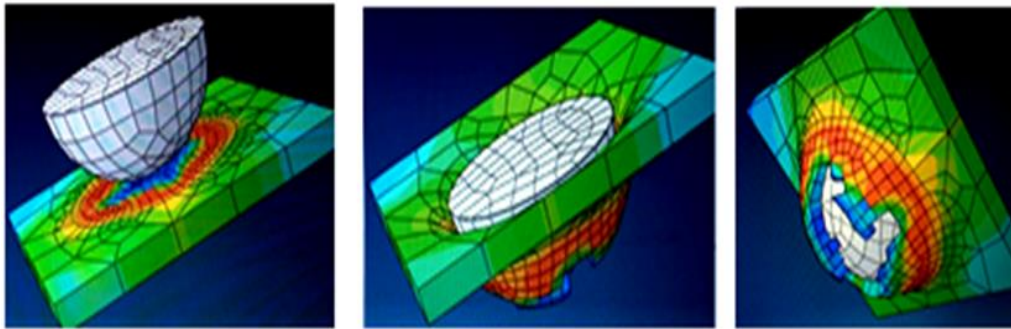
- 2. Fase de processamento:** Nesta parte do processo, a simulação do modelo introduzido é computada. Ele não requer nenhuma entrada do usuário. O tempo de cálculo depende da complexidade do problema e da resolução da malha. Ele consiste apenas no **módulo Job**, no qual o número de núcleos (processadores de computador) é definido. É possível acompanhar a evolução dos resultados e interromper o processo se necessário.
- 3. Fase de pós-processamento:** Na fase final, o usuário pode visualizar os resultados da análise e verificar a evolução das variáveis de interesse (**módulo Visualização**). Esta parte será apresentada na próxima seção,

4 RESULTADOS E CONCLUSÕES

As simulações por TCP foram realizadas utilizando o software ABAQUS(c) 2019 com o objetivo de avaliar o comportamento elastoplástico do Aço API-5L-X70, em termos de SPT, punções e matrizes são considerados elementos rígidos, pois a deformação que sofrem durante o ensaio é desprezível em comparação com a deformação que ocorre nos corpos de prova. A figura 10 ilustra o caso em que o espécime retangular (10x10 mm² e 0,5 mm de espessura) foi fixado usando as condições de contorno aplicáveis usando o software.



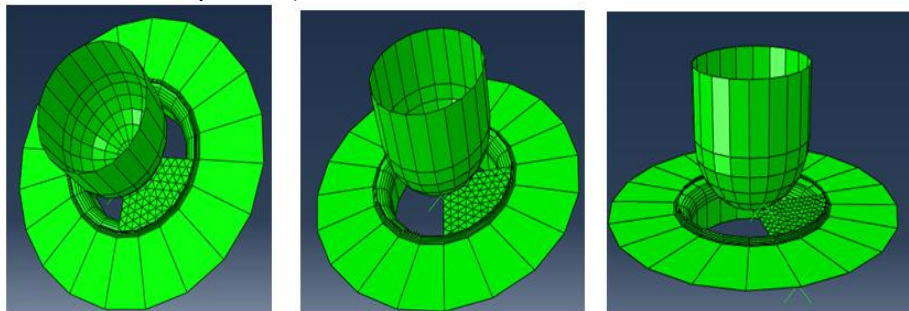
Figura 10. Simulação dos principais estágios de punção, a) impacto, b) penetração, c) ruptura. Números obtidos com a implementação do modelo.



Os espécimes foram considerados corpos elastoplásticos deformáveis e foram modelados com elementos de tamanho 0,025 mm nas áreas onde se rompem.

Como pode ser visto na Fig. 11, o ensaio consiste em fixar o corpo de prova (3 mm de diâmetro e 0,25 mm de espessura) segurando-o firmemente entre duas matrizes e, em seguida, deformar o corpo de prova até sua ruptura com um punch hemisférico na cabeça (raio de 1,25 ou 0,5mm, respectivamente, para os dois tipos de corpos de prova mencionados). Nota-se que o corpo de prova foi representado como um quarto de sua forma total no modelo geométrico aproveitando a simetria do mesmo, das matrizes e do punch, porém os cálculos foram realizados em sua totalidade, isso foi necessário devido às limitações impostas pelo software (versão aluno) mas os resultados não foram comprometidos.

Gráfico 11. Modelo geometricamente simplificado do TCP (desativado para exibir a matriz de fixação superior para melhor observar os detalhes dos outros componentes),

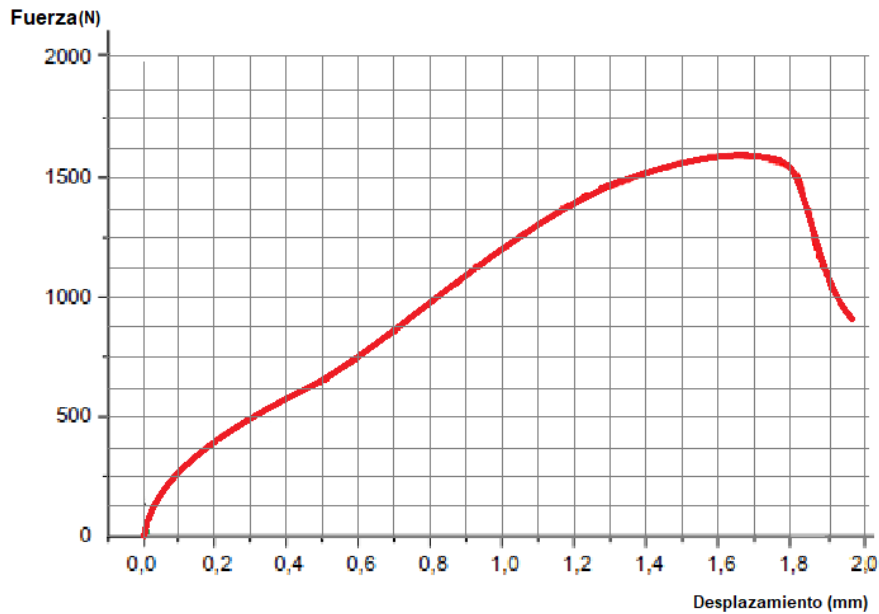


A figura 12.a ilustra a curva força-deslocamento obtida simulando o TCP no ABAQUS (c) 2019, para o espécime de forma circular fixado às matrizes de fixação, nesta curva observam-se as quatro zonas características: ou seja, zona I onde ocorre deformação elástica, na faixa de 0 a 0,2mm, nesta área observa-se uma ligeira influência no contato inicial do punch com o corpo de prova, também é possível observar zona II na faixa de 0,2 a 0,5mm, denominada transição elastoplástica, que apresenta efeitos de contato com a periferia do punch; Na zona III, a deformação plástica generalizada ocorre

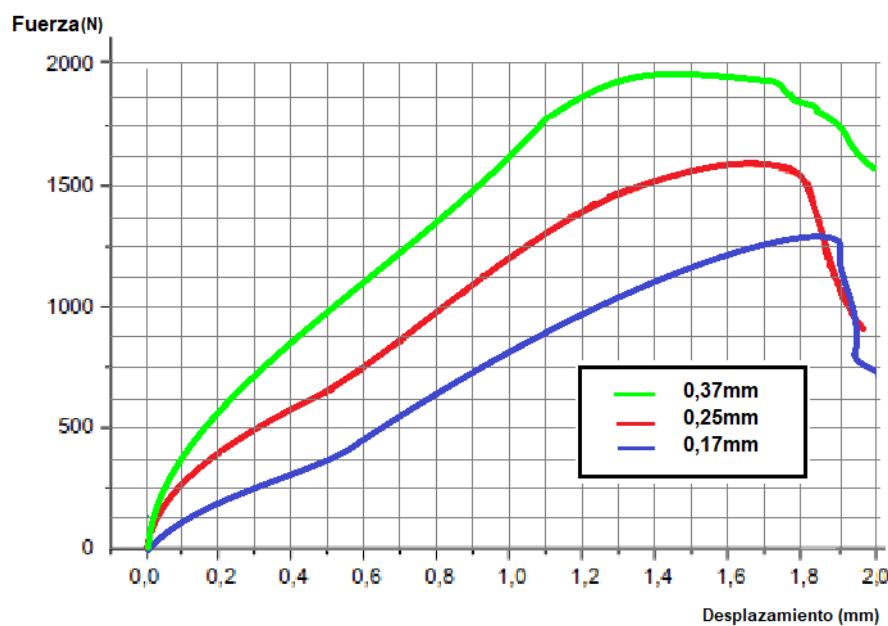


entre 0,5 e 1,4 mm, por fim observa-se a zona IV caracterizada por instabilidade plástica e fratura, na faixa de 1,4 a 1,83 mm.

Gráfico 12. a) Curva Força aplicada vs deslocamento do ponto central do corpo de prova circular, aderido às matrizes de fixação, coeficiente de atrito $\mu = 0,1$; b) Curvas força vs. deslocamento, para três espessuras do corpo de prova circular 0,37; 0,25 e 0,17 mm, coeficiente de atrito $\mu = 0,1$.



a)



(b)

Da Fig. 12.b, que representa as curvas obtidas com o mesmo aço para corpos de prova de 0,37, 0,25 e 0,17mm de espessura, das curvas Força vs. deslocamento observamos a dependência da espessura do corpo de prova utilizado.

Por fim, podemos concluir que foi possível modelar o "Small Punch Test" com sucesso, utilizando o software ABAQUS© 2019-FEM, consequentemente o objetivo principal do trabalho foi



alcançado: "Modelar o small puensaio de trincheira utilizando elementos finitos para obtenção da curva tensão-deformação característica do aço API 5L-X70". Esses resultados são o início de um trabalho contínuo.



REFERÊNCIAS

- Annual Book of ASTM Standards, (2020) American Society for Testing and Materials.
- Bray, Don and E. McBride, (1993) Nondestructive testing techniques, Wiley. Volume9, Issue2, March/April 1993, Pages 159-159.
- EN 10371 Metallic materials, (2021) Small punch test method. European Committee for Standardization (CEN).
- Byun, T. S.; Hong, J. H.; Haggag, F. M. Farrell, K.; Lee, E. H. (1977), Measurement of Through-the-Thickness Variations of Mechanical Properties in SA508 Gr.3 Pressure Vessel Steels Using Ball Indentation Test Technique. International Journal of Pressure Vessels and Piping.
- Chu, S. N. G., and Li, J. C. M. (1977). Impression creep; a new creep test. Journal of Materials Science, 12, 2200-2208.
- CWA 15627, (2008) Small Punch Test for Metallic Materials, CEN Workshop Agreement, European Committee for Standardization.
- Hyde, TH, Sun, W, Brett, SJ., (2009) Some recommendations on standardization of impression creep testing. In: Proceedings of ECCC conference on creep and fracture in high temperature components – design and life assessment (eds Shibli, IA, Holdsworth, SR), Zurich, Switzerland.
- Kumar, K.; Pooleery, A.; Madhusoodanan, K., (2014) Use of Miniature Tensile Specimen and Video Extensometer for Measurement of Mechanical Properties. Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India.
- Kurishita, H., (1994) Current status of small specimen technology in Charpy impact testing. Journal of nuclear materials.
- Torres-Castellanos, N., and Núñez-López, A. M., (2021) Tensile behavior of normal-strength steel-fiber green ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. ACI Materials Journal.