

Sistema automático de determinação da conformabilidade de chapas metálicas, através do ensaio de expansão de furo e de técnicas de processamento digital de imagem

Autores: Daniel J. Cruz, Rui L. Amaral, Abel D. Santos e João Manuel R. S. Tavares (INEGI, FEUP)

RESUMO

As técnicas de ensaio usadas para a caracterização de chapas metálicas providenciam valores de referência fundamentais para o processamento dos materiais por deformação plástica. A indústria de transportes, em particular a automóvel, tem sido um dos grandes responsáveis pela inovação nestes processos, assim como no grande desenvolvimento e uso de materiais, como são exemplo os aços avançados de alta resistência (AHSS, sigla inglesa), os quais se incluem no projeto e nos conceitos de desenvolvimento de estruturas mais leves.

No entanto, estes novos materiais criam novos desafios na tecnologia de conformação plástica e no controlo do processo, em virtude da sua ductilidade mais reduzida e dos seus valores mais elevados de retorno elástico.

Na caracterização da conformabilidade de materiais de chapa metálica, o ensaio de expansão do furo é uma referência industrial na avaliação da ductilidade das faces puncionadas da chapa metálica. No caso dos aços avançados de alta resistência, estes apresentam um desafio adicional à tecnologia de conformação plástica pela sua menor ductilidade e pela correspondente obtenção de fissuras nestas zonas puncionadas, por corte mecânico. Estas são as motivações para a importância do uso do ensaio de expansão do furo e para a determinação com rigor, repetibilidade e eficiência da medida de ductilidade, que se obtém por este ensaio.

Nesse sentido foi desenvolvida e é aqui apresentada uma metodologia automatizada do ensaio de expansão de furo, como alternativa à metodologia tradicional de medições diretas e pós-processamento realizados por um operador, a qual pode conter subjetividade e ter impacto em resultados inconsistentes e com baixa reprodutibilidade.

O método desenvolvido e aqui apresentado faz uso de processamento digital de imagem e utiliza algoritmos avançados para detetar o aparecimento das primeiras fissuras nas faces das zonas processadas por corte, permitindo uma determinação mais precisa do coeficiente de expansão do furo (HER – Hole Expansion Ratio).

Adicionalmente, fornece informações valiosas sobre a evolução do diâmetro do

furo, permitindo uma compreensão abrangente do comportamento do material durante a deformação. O método proposto foi avaliado para diferentes materiais e os valores de HER correspondentes foram comparados com o método tradicional, mostrando as suas potencialidades em termos de rigor e eficiência.

Palavras-chave:

Fissuração na face puncionada; coeficiente de expansão do furo; binarização adaptativa de imagens; transformação circular; aços avançados de alta resistência

1. INTRODUÇÃO

O uso de novos materiais para reduzir o peso dos veículos automóveis é crucial para melhorar a eficiência energética e desenvolver veículos de baixo consumo, enquadrando-se na filosofia e nos conceitos de desenvolvimento de estruturas mais leves [1].

Em paralelo com a utilização híbrida de diferentes materiais, os aços avançados de alta resistência (AHSS) e as ligas de alumínio são exemplos de materiais mais frequentemente usados para atingir esses objetivos [2].

Os AHSS apresentam tipicamente tensões de cedência adequadas, bem como elevadas tensões de rotura, que são essenciais para garantir a segurança das estruturas e dos passageiros. No entanto, o seu processamento apresenta alguns desafios, pois durante o processo de conformação plástica, o material sofre diferentes tipos de carregamentos envolvendo flexão, tração e estiramento, com trajetórias de deformação complexas, que podem promover fissuras nas zonas puncionadas do esboço da chapa metálica.

Para o controlo da aptidão do material, em especial para as situações que envolvem o alongamento das faces puncionadas em operações de dobra-gem de abas ou em situações de expansão de furos em operações de rebordagem (formação de gola) existe um ensaio especialmente adequado, que é o ensaio de expansão de furo [3, 4].

Este é um ensaio de conformabilidade dos materiais em chapa metálica, comumente usado na indústria para avaliar a capacidade de deformação do material sem fissuração das faces da chapa obtidas por corte mecânico [5] (e.g., puncionamento), sendo um ensaio definido pela norma ISO 16630 [6].

Neste ensaio, usa-se uma chapa metálica (esboço) que tem um furo com um diâmetro especificado e obtido por puncionamento, o qual vai ser alargado (expandido) por um punção cónico, criando-se uma gola que vai sendo deformada até se obter uma fissura visível no contorno puncionado da chapa (fissura segundo a espessura). Desse modo se obtém o coeficiente de expansão do furo (HER - Hole Expansion Ratio) de acordo com a seguinte expressão:

$$HER(\%) = \frac{D_f - D_i}{D_f} \times 100, \quad (1)$$

em que D_f (mm) representa o diâmetro do furo final expandido e D_i (mm) o diâmetro inicial do furo puncionado.

A ocorrência de uma fissura inicial neste ensaio é avaliada manualmente através de inspeção visual e contando também com a experiência do operador. Porém, em alguns casos, o operador pode não reconhecer o momento certo para interromper o ensaio, levando à propagação da fissura e, conseqüentemente, aumentando a medição do diâmetro final do furo [7]. Essa subjetividade humana pode levar a erros e desvios significativos nos resultados experimentais. Além disso, para certos materiais, a primeira fissura obtida pode não ser detetada com uma repetibilidade perfeita em diferentes tentativas, o que pode aumentar a dispersão do coeficiente de expansão do furo para um determinado material.

Existem várias abordagens para determinar experimentalmente o início da fissuração durante o ensaio de expansão do furo. *Dunckelmeyer et al.* [8] e *Panich et al.* [9] relacionaram o aparecimento de uma fissura na face do furo com a possível queda na curva força-deslocamento do punção. No entanto, este método

pode não funcionar para alguns materiais e condições de ensaio, uma vez que podem aparecer microfissuras múltiplas em simultâneo. *Leonhardt et al.* [10] usaram um sistema pneumático automatizado para detetar o início da fissura e concluíram que a abordagem desenvolvida apresenta sensibilidade suficiente para determinar com precisão o HER para diferentes parâmetros do processo, como seja a folga de corte e diâmetro inicial do furo puncionado.

Um método eficaz para monitorizar o desenvolvimento de fissuras durante o ensaio é a implementação de técnicas de correlação de imagem digital (DIC – *Digital Image Correlation*). Esta técnica de medição ótica é amplamente utilizada em mecânica experimental para analisar o deslocamento e a deformação de um objeto ou superfície, comparando imagens adquiridas antes e depois da deformação [11, 12]. Ao adquirir uma sequência contínua de imagens durante o processo de expansão do furo, esta abordagem permite a determinação precisa do momento exato em que aparece a primeira fissura na face do furo e simplifica a análise de sua propagação [13]. Além disso, as técnicas DIC têm a capacidade de medir a distribuição de deformação na face do furo durante o processo de expansão. *Chen et al.* [14] empregaram uma técnica DIC para medir o campo de deformação do furo expandido na superfície superior da amostra, mostrando a sua importância para a compreensão do comportamento da deformação e dos mecanismos de fratura do material em análise. *Li et al.* [15] posteriormente fizeram uso de um sistema ARAMIS para observar a deformação da amostra e investigar a influência de variáveis experimentais no coeficiente de expansão do furo, como seja o sentido da rebarba, o método de obtenção do furo e folga (e.g. puncionado ou maquinado), espessura da chapa ou ainda o formato do punção. *Krempaszky et al.* [16] e *Wang et al.* [17] usaram um siste-

ma digital equipado com duas câmaras (CCD) para medir o coeficiente de expansão do furo e gerar imagens 3D precisas, do início da fissura. *Barlo et al.* [18] investigaram as condições de ensaio do HET fazendo uso de freios (*draw-bead*) nas ferramentas de ensaio experimentais. Adicionalmente, usaram imagens adquiridas por um sistema 3D DIC para obter o coeficiente de expansão do furo, reduzindo assim o impacto do pós-processamento que pode depender do operador. Os sistemas de correlação de imagens digitais normalmente requerem equipamentos sofisticados e caros, incluindo câmaras de alta resolução, lentes especializadas e procedimentos complexos de calibração. A necessidade de tais equipamentos e procedimentos pode tornar demorada a configuração e implementação de técnicas DIC para ensaios de expansão de furo.

Face às desvantagens associadas aos sistemas DIC, o uso de técnicas de processamento digital de imagens (DIP) surgiu como uma alternativa mais simples e viável para a deteção de fissuras durante o ensaio de expansão do furo [19]. Essas técnicas referem-se a uma ampla gama de métodos e algoritmos usados para modificar e extrair informações de imagens digitais [20, 21]. *Chiriac et al.* [22] utilizaram um Sistema Digital de Gravação e Medição (DRMS) para determinar com precisão o HER para diferentes aços bifásicos, tendo como resultado uma redução na variabilidade dos valores do coeficiente de expansão do furo. Durante o ensaio, o sistema adquire e exhibe a aresta do furo puncionado em tempo real. Após o ensaio, reproduz-se a sequência de imagens adquiridas, permitindo uma análise imagem-a-imagem da evolução do dano correspondente à obtenção da fissura. Esta análise semiautomática permite a seleção da imagem correspondente ao início de uma fissura. Medindo o diâmetro interno do furo na superfície selecionada, os autores calculam com precisão o coeficiente final de expansão do furo. Uma abordagem semelhante foi usada por *Kim et al.* [23]. No seu estudo, os autores utilizaram um sistema visual para monitorizar a expansão da superfície do furo e investigaram os efeitos de processos de obtenção do furo nos resultados do coeficiente de expansão do furo. Em ambos os estudos, a fissura segundo a espessura é identificada e analisada manualmente por meio de uma sequência de imagens pré-adquiridas, o que ainda pode introduzir um elemento de subjetividade humana e ter impacto na consistência e rigor dos resultados. Para tentar ultrapassar os desafios associados à identificação manual de fissuras, *Choi et al.* [24] desenvolveram um algoritmo para inspeção inteligente de fissuras com base em técnicas de processamento de imagem, principalmente as de binarização e deteção de *blobs*. A palavra “blob” é uma abreviação de “binary large object” (objeto binário grande) e é usada para descrever regiões contíguas de pixels que formam uma entidade visual coesa. Este algoritmo pode detetar automaticamente a presença de uma fissura ao longo da espessura e calcular o correspondente valor HER. *Park et al.* [25] desenvolveram um sistema de análise integrado que combina visão computacional com análise de carga de punção para melhorar a precisão das medições. O sistema inclui um algoritmo automatizado de processamento de imagem, que reduz o risco de erro humano e permite uma previsão com mais rigor das medições.

Cruz et al. [26] desenvolveram um dispositivo instrumentado para adquirir a evolução em tempo real das dimensões do furo durante o ensaio. De-

envolveram adicionalmente uma ferramenta de processamento digital de imagem (DIP), baseada na Transformada Circular de Hough (CHT), para detetar e medir automaticamente os diferentes diâmetros do furo, permitindo uma determinação mais precisa do coeficiente de expansão final do furo. Esta metodologia é adequada para materiais em chapa com espessuras entre 0,5 e 3 mm. Os resultados foram mais consistentes e precisos quando comparados com o método tradicional de medição manual. Apesar destes desenvolvimentos, o momento de medir o valor de HER, ou seja, a ocorrência de fissura ao longo da espessura, ainda é escolhido manualmente por meio de uma sequência de imagens pré-adquiridas.

Este artigo pretende dar continuidade ao trabalho aqui apresentado, explorando diferentes técnicas de processamento digital de imagens para detetar automaticamente a ocorrência de fissuras no ensaio de expansão de furos, contribuindo assim para a melhoria da previsão não só do valor de HER, mas também da evolução do diâmetro do furo expandido durante o ensaio.

2. ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios de expansão de furo foram realizados de acordo com a norma ISO 16630 [6] utilizando uma máquina de ensaios universal desenvolvida por Duarte et al. [27].

Este equipamento de acionamento hidráulico tem a flexibilidade para a realização de diferentes ensaios necessários para estudar o comportamento de materiais usados em conformação plástica de chapa, nos quais se incluem os ensaios de expansão de furo, o ensaio *Erichsen*, o ensaio *Nakajima* ou o ensaio *Fukui*, bastando simplesmente substituir as ferramentas necessárias para cada ensaio [28].

Uma representação esquemática da configuração da ferramenta de expansão de furo (HET) está apresentada na Figura 1.

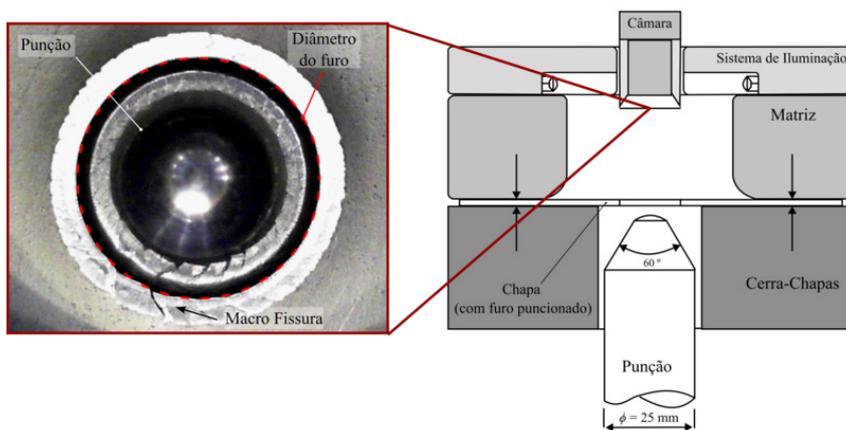


Figura 1. Configuração experimental utilizada para o ensaio de expansão do furo (adaptado de [26]).

O sistema desenvolvido por Cruz et al. [26] foi utilizado para adquirir a evolução em tempo real das imagens correspondentes à expansão do furo

ao longo do ensaio. O sistema de aquisição de imagens apresentado na Figura 1 é composto por uma câmara web digital (Microsoft LifeCam Studio Win USB 1080p) com resolução máxima de 2560x2048 pixels e taxa máxima de aquisição de imagens de 30 fps.

Adicionalmente existe um dispositivo de iluminação instalado no centro da parte superior do sistema, que consiste numa faixa LED de alta intensidade que distribui a luz uniformemente na superfície cortada do furo. Por outro lado, o punção cónico usado no ensaio que tem um ângulo de cone de 60° e cujo maior diâmetro é de $\varnothing 25\text{mm}$ foi revestido com uma camada negra de PVD. Este tipo de revestimento, conforme mostrado na Figura 1, cria na imagem adquirida uma região de alto contraste entre o limite interno do furo expandido e a superfície do punção, o que é essencial para a identificação das fissuras na face puncionada do furo e para aplicação de técnicas de processamento digital de imagem (DIP). O sistema de aquisição de imagens é sincronizado diretamente com a máquina universal de ensaios. Portanto, durante cada ensaio faz-se a gravação de uma sequência de imagens (registo vídeo), em simultâneo com os sinais de deslocamento e força do punção. O ensaio é interrompido quando o operador vê uma fissura macro em toda a espessura da face do furo. Nesta altura, remove-se o provete de ensaio (chapa com furo) e pode calcular-se o valor HER, coeficiente de expansão de furo, usando a sequência de imagens adquiridas através do algoritmo de processamento de imagem digital proposto.

Durante o ensaio de expansão do furo, o punção move-se verticalmente e o plano onde o diâmetro interno é medido aproxima-se sucessivamente da câmara. Por essa razão, a resolução do sistema, ou seja, a relação entre pixels (px) e milímetros (mm), no plano de medição varia ao longo do ensaio. Para ter em conta, com precisão, esta evolução e resolver

quaisquer distorções óticas, realizou-se um procedimento de calibração para diferentes planos de medição usando referências de calibração, que se apresentam esquematicamente na Figura 2. Deste modo é possível fazer medições com círculos e diâmetros bem conhecidos, D , considerados numa gama entre 6 e 30 mm. O plano de medição é definido como o plano onde se mede o diâmetro interno e o seu deslocamento vertical é dado por $\Delta d_{m,plan}$. No processo de calibração apresentado, os diferentes deslocamentos do plano de medição foram definidos aproximando o círculo a medir da câmara usando o movimento do punção. Os resultados da calibração obtidos com este procedimento estão apresentados na Figura 2, que permite compreender a relação entre os diâmetros conhecidos dos círculos de medição, em milímetros e os seus correspondentes valores em pixels.

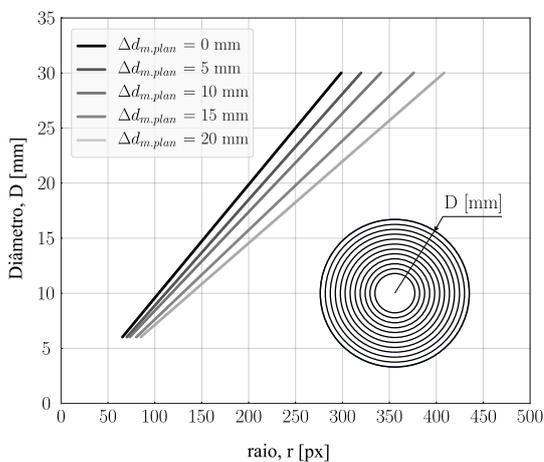


Figura 2. Resolução do sistema de aquisição de imagens utilizando círculos de calibração para diferentes deslocamentos do plano de medição, (adaptado de [26]).

3. ALGORITMO DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

O primeiro passo da metodologia proposta é extrair automaticamente diversas imagens da sequência de vídeo pré-gra-

vada provenientes do ensaio experimental em estudo. Essas imagens são o ponto de partida para a aplicação do algoritmo de processamento digital de imagem (DIP) fornecendo a evolução do aumento do diâmetro do furo durante o ensaio e permitindo a detecção da primeira fissura ao longo da espessura da face do furo. Conforme mostrado na Figura 3, o algoritmo DIP consiste em duas etapas distintas: (a) detecção de fissuras e (b) medição do diâmetro do furo. A etapa de detecção de fissura é responsável por detetar a presença de uma fissura na face do furo do provete enquanto a etapa de medição do diâmetro é responsável por medir a evolução do furo interno do esboço.

Se for identificada a fissura na face do furo, o algoritmo determina o correspondente coeficiente de expansão, considerando o diâmetro inicial do furo (D_i) e o diâmetro deste, determinado quando se inicia a primeira fissura (D_f). Se nenhuma fissura for detetada, o valor do diâmetro da imagem atual é registado e a análise prossegue para a próxima imagem e nova avaliação. Os algoritmos correspondentes às etapas de detecção de fissuras e de medição do diâmetro do furo estão apresentados nas seções seguintes.

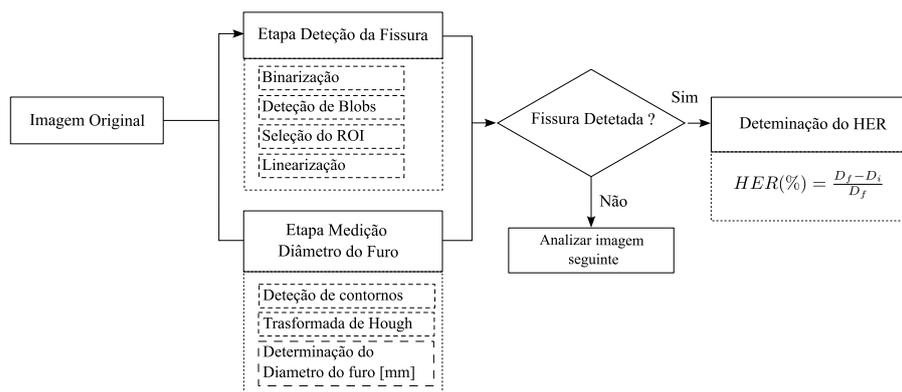


Figura 3. Algoritmo de processamento de imagem digital desenvolvido para identificação de fissuras e medição do diâmetro de furo

3.1 ALGORITMO DE DETECÇÃO DE FISSURA

A etapa de detecção de fissuras consiste em quatro operações distintas e sequenciais de processamento de imagens: binarização, detecção de blobs, seleção da região de interesse (ROI) e linearização. Binarização é o processo de criação de uma imagem binária a partir de uma imagem em escala de cinza usando um método de limiarização [29]. Todos os valores de pixel acima de um limite determinado globalmente (G_t) são convertidos em branco (um valor de bit igual a um) e todos os outros valores são definidos como preto (um valor de bit igual a zero). Dependendo do uso do valor limite, o método de binarização é dividido em binarização global e adaptativa. O método de binarização global utiliza um valor de limite único e constante para toda a imagem, enquanto o método de binarização adaptativa utiliza valores de limite locais onde diferentes valores-limite são calculados para cada pixel da imagem. Este método oferece maior robustez às mudanças na iluminação [29]. Os resultados destes métodos de

limiarização estão apresentados na Figura 4 para uma imagem adquirida durante o ensaio de expansão do furo. Nota-se que a superfície de corte dificilmente é reconhecida pelo método de binarização global, conforme se mostra na Figura 4b. Porém, é possível obter uma imagem nítida de binarização utilizando o método de binarização adaptativa, conforme se vê na Figura 4c.



Figura 4. Métodos de binarização da imagem: (a) imagem original, (b) binarização global e (c) binarização adaptativa

Na visão computacional, a detecção de *blobs* é uma técnica usada para identificar e localizar regiões ou “blobs” que diferem em propriedades, como brilho, cor ou textura, em relação às regiões circundantes. Estas regiões ou bolhas podem corresponder a objetos ou características de interesse na imagem em análise. Para a metodologia proposta foram consideradas diferentes operações incluindo (a) a supressão de estruturas luminosas ligadas aos limites da imagem; (b) a combinação de *pixels* adjacentes através do preenchimento de regiões e furos na imagem; e (c) operações morfológicas, como fecho e extração de limites [30]. Estas operações são fundamentais para uma seleção correta e eficiente da ROI (Região de Interesse). Uma visão geral da etapa de detecção de *blobs* é mostrada na Figura 5. Após esta etapa, o ROI deve ser definido para a correta identificação de fissuras. A maior área fechada é então selecionada, resultando numa estrutura tipo anel, conforme se vê na Figura 5b. Esta estrutura corresponde à superfície de corte do furo pré-perfurado e é a região onde se realiza o processo de identificação da fissura. Os parâmetros de cada operação foram cuidadosamente escolhidos, tendo em consideração as características específicas das fissuras e foram testados para identificar de forma robusta fissuras macro em vez de pequenas fissuras, com uma resolução de $\pm 0,1$ mm.

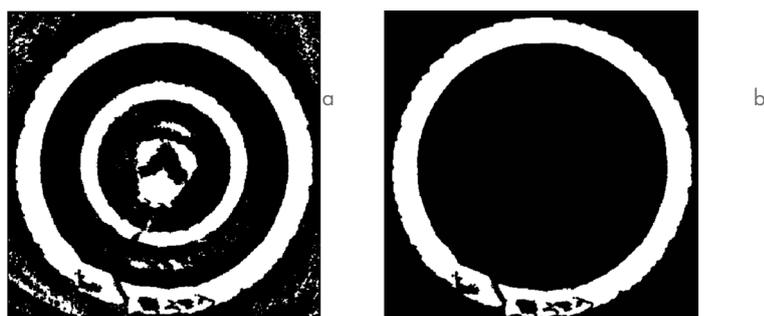


Figura 5. Etapas de detecção de blobs e seleção de ROI: (a) imagem resultante após operações morfológicas (limpar bordas, fechar máscara e preencher furos) e (b) Região de interesse selecionada (ROI).

A etapa final do algoritmo de detecção de fissuras é a chamada etapa de linearização da imagem, que consiste em linearizar a superfície de corte, conforme representado na Figura 6, o que permite simplificar a detecção de fissuras. Nesta etapa, uma nova imagem é construída considerando uma transposição de coordenadas cartesianas para coordenadas polares. Utilizando esta transposição, é possível transformar o perfil circunferencial (Figura 6a) da superfície de corte num perfil linear (Figura 6b). O centro da ROI desejado é determinado usando a transformada de *Hough* [31, 32], que é apresentada em detalhes na próxima seção. Analisando a imagem representada é possível diferenciar claramente as fronteiras interna e externa da superfície de corte. Além disso, este tipo de representação linear é vantajosa para identificar se a fissura existe. Conforme se vê na figura 6b, a fissura é identificada automaticamente quando o único *blob* da região de interesse da imagem original é dividido em dois ou mais *blobs* independentes. Neste exemplo, foram identificados dois *blobs* distintos indicando a presença de uma fissura que se estende pela espessura do material. Por outro lado, se a análise da imagem linearizada revelar apenas um único *blob* dentro da ROI, isso significa que a fissura não se propagou completamente ao longo da espessura do material. Nesses casos, a presença de um único *blob* sugere que a fissura será uma fissura local ou parcial e não uma fissura que se estende totalmente ao longo da espessura do material.

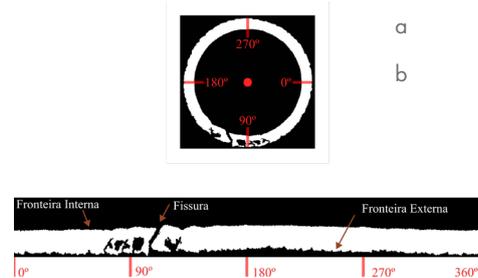


Figura 6. Representação esquemática do procedimento de linearização de imagens: (a) imagem original (ROI), (b) imagem com identificação das fronteiras internas/externas e de fissuras

3.2. ALGORITMO DE MEDIÇÃO DE DIÂMETRO DE FURO

O principal objetivo do algoritmo apresentado nesta seção é identificar e medir a evolução do diâmetro do furo durante o ensaio de expansão do furo. A Figura 7 ilustra as diferentes etapas da metodologia desenvolvida aplicada à imagem de referência utilizada na Seção 3.1. Para detectar e medir o valor do diâmetro em cada imagem utiliza-se um algoritmo baseado na transformada de Hough (HT). A HT é uma técnica popular de processamento de imagem para detectar formas simples numa imagem, como linhas, círculos ou elipses. Esta metodologia foi proposta pela primeira vez por Paul Hough [33] em 1962 para detectar linhas retas. Essencialmente, funciona transformando a imagem do domínio espacial original para um espaço em que os parâmetros da geometria são representados como pontos.

A Transformada Circular de Hough (CHT) é uma variação da HT e é uma técnica robusta usada para detectar formas circulares, como círculos ou arcos, no caso de imagens com ruído ou que estejam distorcidas. Duda e Hart introduziram esta técnica em 1972 [34] como uma extensão da transformada original. A CHT transforma os dados da imagem do domínio espacial num espaço paramétrico, onde os círculos são representados pelas suas coordenadas centrais (x, y) e raio (r) . Cada ponto da imagem é representado como um círculo no espaço paramétrico, e a acumulação desses círculos resulta numa matriz bidimensional chamada acumulador de Hough, que contém as combinações de parâmetros que recebem mais votos. Para detectar círculos usando a CHT, os picos máximos no acumulador de Hough correspondem às coordenadas centrais e ao raio dos círculos na imagem. O número de picos detetados corresponde ao número de círculos presentes na imagem [35].

É necessária uma operação preliminar de detecção de contornos para se aplicar corretamente a CHT a uma imagem. A detecção de contornos é uma técnica de processamento digital de imagem, usada para identificar e destacar as curvas que limitam uma imagem, definidas como as fronteiras entre duas regiões com intensidades ou valores de cores diferentes. Os métodos de detecção de contornos mais comumente usados são o operador Sobel, o detetor de contornos Canny e o Laplaciano do método Gaussiano. Neste trabalho faz-se uso do método de detecção de contornos Canny [36], que envolve várias etapas, como a redução de ruído, o cálculo do gradiente e a supressão de não máximos e limiarização por histerese. Foi adotado um valor limite de 0,5, resultando numa imagem binária como a representada na Figura 7b com um contorno claro e nítido destacado a branco [37].

Após a etapa de detecção de contornos, aplicam-se diversas operações morfológicas intermediárias (Figura 7c) para simplificar a seleção da região de interesse. De seguida, aplica-se a CHT à ROI selecionada, conforme se mostra na Figura 7d, para obter os diâmetros interno e externo de cada imagem em *pixels*. O diâmetro interno final, $2r$, é convertido de *pixels* para milímetros usando um fator de conversão que leva em consideração múltiplos fatores, incluindo a resolução do sistema de aquisição de imagem, conforme discutido na Seção 2, a espessura do material e o deslocamento do punção no momento da aquisição da imagem [26]. A metodologia descrita pode ser usada para materiais em chapa com espessuras variando de 0,5 a 3 mm, medindo-se diâmetros de furos com uma precisão de $\pm 0,1$ mm.

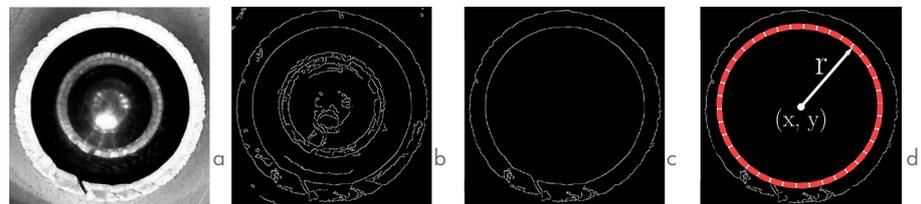


Figura 7. Algoritmo de medição do diâmetro do furo: (a) imagem original em cinza, (b) detecção de face e arestas do furo usando o detetor de curvas Canny, (c) seleção da ROI e (d) aplicação da Transformada Circular de Hough.

3.3. APLICAÇÃO DO ALGORITMO DIP

O algoritmo DIP desenvolvido foi testado e validado usando dados experimentais de ensaios de expansão de furo realizados em três aços feríticos distintos [38] com diferentes espessuras e propriedades mecânicas. A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas para cada material estudado (segundo a direção de laminagem - RD), conforme a norma ISO 6892 [39], bem como as respetivas espessuras. Os furos foram realizados em cada provete por puncionamento, considerando uma folga de corte de 15%. São usadas duas amostras para cada material, tendo-se obtido os resultados de ensaios em diferentes materiais e espessuras, permitindo ainda testar qualquer variabilidade para o atual procedimento automatizado. O diâmetro inicial do furo, também apresentado na Tabela 3, foi

medido utilizando-se um micrómetro interno digital de três pontos Mitutoyo com passo de 0,001 mm. Para cada material, o ensaio de expansão do furo foi realizado considerando uma velocidade constante de punção de 0,5 mm/min com uma força de retenção do cerra-chapas de 25 kN.

As imagens foram adquiridas a uma taxa de 5 fps. Neste trabalho experimental, a morfologia da fissura expandida (macrofratura) definida por Li et al. [40] foi adotada como critério para interromper o ensaio de expansão do furo.

Tabela 3. Propriedades fundamentais e informações adicionais dos materiais de chapa metálica estudados.

Material	Espessura	Tensão de Cedência	Tensão de Ruptura	Alongamento Uniforme	Diametro Inicial
ID	t [mm]	Re [MPa]	Rm [MPa]	A(50%)	[mm]
#1	2.514	480.28	548.82	26.5	10.031
#2	2.319	517.83	581.20	23.5	10.029
#3	1.997	577.93	611.54	24.0	10.028

4. RESULTADOS

Os dados força-deslocamento obtidos para os materiais estudados durante a expansão do furo estão apresentados na Figura 8. Cada curva representa a relação força-deslocamento durante a expansão do furo, sendo também indicado o ponto de fissura identificado pelo algoritmo DIP. A linha pontilhada em cada curva indica os dados experimentais adquiridos entre o ponto de fissuração e o final do ensaio. A evolução da relação deslocamento-força do punção apresenta tendência semelhante para todas as amostras estudadas e o ponto identificado pelo algoritmo DIP é consistente entre os diferentes materiais. No entanto, é importante reconhecer que a natureza estocástica da fratura introduz incerteza na observação da primeira fissura e no comportamento geral da fratura.

Conforme mencionado anteriormente, o algoritmo DIP foi desenvolvido para detectar fissuras e medir diâmetros dos furos, durante os ensaios de expansão de furo. As Figuras 9–11 mostram a evolução do diâmetro do furo durante os ensaios para os materiais #1, #2 e #3. Cada material possui uma curva representativa do diâmetro do furo traçada em relação ao deslocamento do punção até o ponto de fissuração. Neste ponto, o diâmetro medido corresponde ao diâmetro final, D_{ff} , que é utilizado para calcular o HER final através da Equação (1). Como pode ser observado na análise da Figura 8, os pontos pontilhados, além do ponto de fissuração, indicam expansão excessiva do diâmetro do furo após a detecção da fissura. Ao contrário do método tradicional [39], que avalia o diâmetro final após a interrupção do ensaio e a remoção do punção, o método desenvolvido calcula o valor de HER usando a imagem adquirida quando a primeira macrofissura aparece. Assim os valores de HER obtidos pelo método desenvolvido tendem a ser inferiores e mais conservadores do que aqueles obtidos pela medição manual, conforme se confirma pelos resultados apresentados na Tabela 4. A tabela apresenta os valores de diâmetro do furo expandido obtidos pelo algoritmo DIP desenvolvido e aqueles medidos usando um micrómetro interno digital de três pontos Mitutoyo (medição direta). Os valores HER correspondentes também são apresentados para cada amostra. O material #2 possui maior capacidade de deformação sem surgimento de fissuras, apresentando um valor de HER de aproximadamente 73%, em contraste com o material #3, que possui menor capacidade de deformação sem fissuras (HER 33%). De notar que estes valores são sobrestimados quando se usa a medição direta, com valores de HER de 81,0% para o material #2 e 42,5% para o material #3. O erro relativo entre amostras é inferior a 0,5% para os materiais nº 1 e nº 2, e inferior a 3% para o material nº 3.

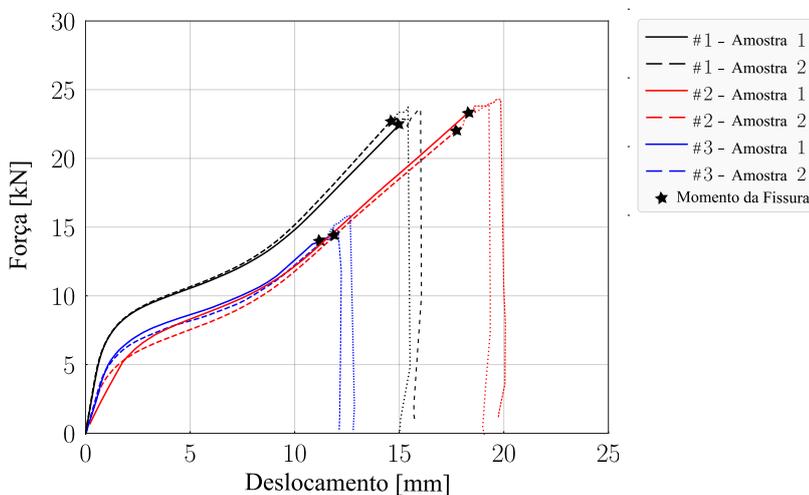


Figura 8. Curvas força-deslocamento do punção obtidas nos ensaios realizados de expansão do furo (HET)

Esses valores são maiores quando se utiliza medição direta, com erros relativos de 2,5% para os materiais #1 e #2, e de 6,5% para o material #3.

Tabela 4. Valores de HER obtidos pelo algoritmo DIP e medição direta

	Material ID	Algoritmo DIP	Medição Direta	
#1	Amostra 1	[mm]	14.98	15.26
		HER [%]	49.4	52.1
	Amostra 2	[mm]	15.03	15.50
		HER [%]	49.8	54.5
	Erro Relativo(%)	HER	0.4%	2.4%
#2	Amostra 1	[mm]	17.42	18.12
		HER [%]	73.7	80.7
	Amostra 2	[mm]	17.36	18.18
		HER [%]	73.2	81.3
	Erro Relativo (%)	HER	0.5%	0.6%
#3	Amostra 1	[mm]	13.20	14.61
		HER [%]	31.6	45.6
	Amostra 2	[mm]	13.47	13.97
		HER [%]	34.4	39.4
	Erro Relativo(%)	HER	2.8%	6.2%

Ao analisar mais detalhadamente a evolução do diâmetro do furo com o deslocamento do punção, compreende-se que as curvas para os três materiais têm uma tendência semelhante. Além disso, podem ser identificadas duas zonas distintas nestas curvas. Para deslocamentos do punção até 7,5 mm nos materiais #1 e #2, e 5 mm para o material #3, a evolução do diâmetro do furo permanece quase constante, com valor igual ao diâmetro inicial (= 10 mm), e não aumenta signi-

ficativamente com deslocamento do punção. Após atingir este ponto, a evolução do diâmetro do furo muda significativamente, e a relação entre o deslocamento do punção e o diâmetro do furo torna-se linear com uma inclinação bem definida.

No início do ensaio, o esboço é plano e os diâmetros interno e externo são coincidentes. Contudo, à medida que o punção se move, a face de corte puncionada do furo inclina-se e torna-se visível na imagem adquirida. Portanto, no início do ensaio, o algoritmo DIP só consegue detectar o diâmetro externo e apenas começa a detectar o diâmetro interno quando a espessura se torna visível na imagem. Este fenômeno fica evidente nos resultados para o material #1, onde o algoritmo DIP apenas detecta e mede o diâmetro externo do furo entre 0 (zero) e 5 mm, pois está associado à inclinação da espessura. Neste caso específico, pode-se observar um aumento no diâmetro externo com o deslocamento do punção. Após 5 mm de deslocamento, o diâmetro interno torna-se visível na imagem adquirida e é medido pelo algoritmo proposto, resultando na redução do valor estimado. À medida que o punção avança, o diâmetro interno é medido progressivamente, resultando numa evolução linear. Uma análise semelhante pode ser realizada para os demais materiais.

As Figuras 9b, 10b e 11b mostram, sequencialmente, a aplicação do algoritmo DIP desenvolvido, para detectar a fissura e medir o diâmetro final do furo, , respectivamente para o caso dos materiais #1, #2 e #3. A primeira imagem representa a imagem inicial e a segunda representa a imagem binarizada com a ROI selecionada. A terceira representa a imagem linearizada e a identificação do número de blobs. Como se vê, o algoritmo DIP foi aplicado com sucesso para os materiais selecionados, todos apresentando uma única fissura que gera duas zonas independentes na imagem linearizada.

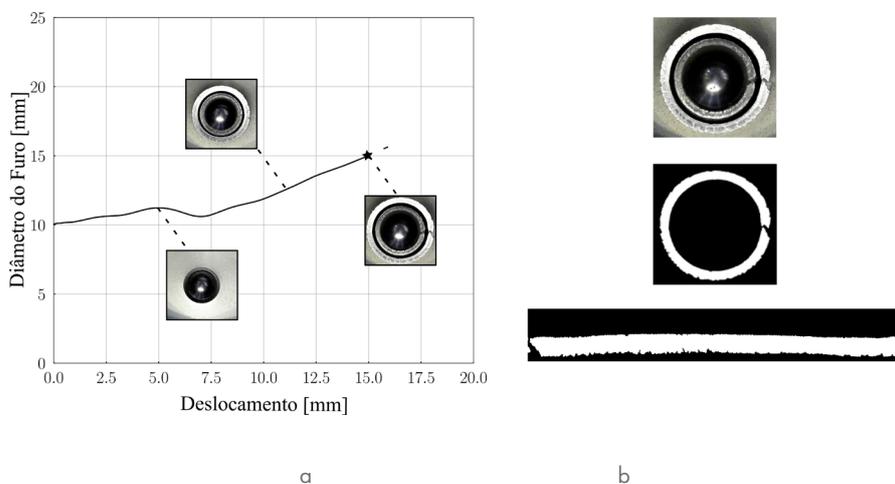


Figura 9. (a) Representação da evolução do diâmetro do furo durante o ensaio e (b) aplicação do algoritmo DIP desenvolvido, à imagem com fissura para o material ID #1

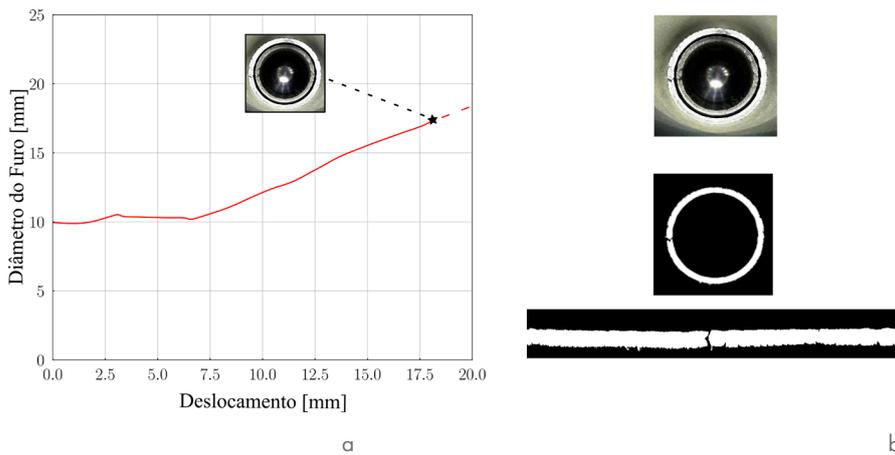


Figura 10. (a) Representação da evolução do diâmetro do furo durante o teste e (b) aplicação do algoritmo DIP desenvolvido à imagem com fissura de espessura total para o material ID #2

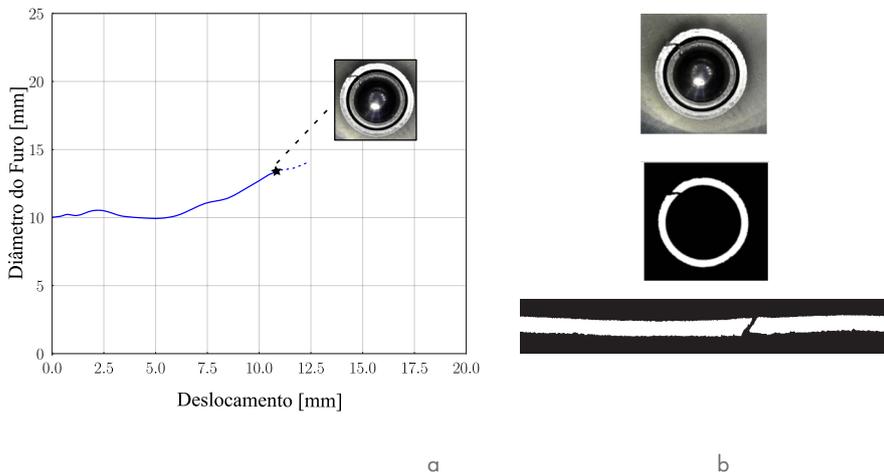


Figura 11. (a) Representação da evolução do diâmetro do furo durante o teste e (b) aplicação do algoritmo DIP desenvolvido à imagem com fissura de espessura total para o material ID #3

5. CONCLUSÕES

Apresenta-se com este trabalho um método inovador que tem por base as tecnologias mais atuais de processamento digital de imagem e cujos objetivos passaram pela sua aplicação aos ensaios de expansão de furo (HET), visando melhorar e automatizar a detecção de fissuras e a medição do correspondente diâmetro final, de modo a avaliar e quantificar a ductilidade das faces obtidas por corte, nos materiais em chapa metálica.

Neste desenvolvimento foi projetado um novo sistema experimental de aquisição de imagens que permite adquirir a evolução do furo durante o ensaio, sincronizado com o deslocamento do punção e com os sinais de força.

Após o ensaio, aplica-se um algoritmo de processamento de imagem, fazendo o pós-processamento da sequência de imagens adquiridas, de-

tetando o início da primeira fissura e medindo automaticamente os diâmetros correspondentes do furo.

O algoritmo de processamento digital de imagens desenvolvido compreende dois subprocedimentos: detecção de fissuras e; medição do diâmetro do furo. O primeiro envolve binarização, detecção de *blobs*, seleção da região de interesse, linearização e identificação de fissuras. A binarização adaptativa é proposta para aumentar a versatilidade do algoritmo, permitindo a sua aplicação a diferentes materiais de chapa metálica com diferentes espessuras. O algoritmo identifica a fissura quando um único *blob* é separado em vários *blobs* independentes na imagem linearizada. A segunda utiliza a transformada de *Hough* para identificar e medir o diâmetro interno do furo expandido durante o ensaio. Além disso, determina-se o valor HER (coeficiente de expansão de furo) correspondente ao momento em que se identifica fissura ao longo da espessura na etapa de detecção de fissuras. A complexidade dos algoritmos desenvolvidos foi decomposta numa série de operações simples que não requerem elevados custos computacionais. Portanto, a simplicidade das operações permite uma execução e análise eficiente das imagens adquiridas, tornando o método proposto, prático e acessível para implementação em diversos ambientes experimentais.

O método proposto foi validado com ensaios de expansão de furo em três chapas metálicas de materiais diferentes e diferentes valores de espessura. Os resultados mostram uma excelente precisão do procedimento automatizado, em especial, quando comparado com a metodologia manual. Adicionalmente, a repetibilidade dos resultados obtidos mostra uma melhoria alcançada pela metodologia desenvolvida devido à sua precisão superior. Deve-se notar que sendo ensaios experimentais significa que o material se pode comportar com alguma incerteza na fratura e na observação da

primeira fissura na face do furo, em virtude do comportamento estocástico da fratura. O método proposto usando este procedimento automatizado apresenta uma determinação mais confiável do coeficiente de expansão do furo, sendo perfeitamente adequado para aplicações industriais com resultados repetíveis e não dependentes das aptidões e da experiência do operador.

Trabalhos futuros focar-se-ão na validação experimental do algoritmo DIP para materiais com diferentes tratamen-

tos superficiais, que podem ter propriedades de refletância distintas. Além disso, o desempenho do algoritmo será avaliado na presença de fissuras duplas, que podem apresentar múltiplos *blobs* independentes. Estas condições de ensaio podem exigir uma calibração mais detalhada dos parâmetros do algoritmo. A eficácia do algoritmo desenvolvido para automatizar totalmente o ensaio HET será avaliada utilizando-o durante o ensaio, e não apenas como uma ferramenta de pós-processamento. Esta melhoria na metodologia de ensaio ajudará a evitar a propagação de fissuras, uma vez que o ensaio irá parar automaticamente assim que o algoritmo DIP detectar a presença de uma fissura, garantindo uma avaliação mais precisa do coeficiente de expansão do furo.

REFERÊNCIAS

1. Luo, A.A., *Recent advances in light metals and manufacturing for automotive applications*. CIM Journal, 2021. **12**(3): p. 79-87.
2. Ghosh, M., A. Ghosh, and A. Roy, *Renewable and sustainable materials in automotive industry*, in *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. 2020, Elsevier. p. 162-179.
3. A. Dias dos Santos, J.F.D., A. Barata da Rocha, *Tecnologia da embutidura : princípios e aplicações* ed. I. -I.d.E.M.e.G. Indústria. 2005.
4. Santos, R.O., et al., *Development of a device compatible with universal testing machine to perform hole expansion and Erichsen cupping tests*. Machines, 2019. **8**(1): p. 2.
5. J. Ferreira Duarte, A.B.d.R., A. Dias dos Santos, *Corte em ferramenta 2003*: INEGI.
6. ISO 16630:2009 - *Metallic Materials - Sheet and Strip - Hole Expanding Test*; International Organization for Standardization: 2009.
7. Hance, B., *Practical Application of the Hole Expansion Test*. SAE International Journal of Engines, 2017. **10**: p. 247-257.
8. Dünckelmeyer, M., Kremaszky, C., Werner, E., & Doppler, C. (2009). Instrumented hole expansion test., *Instrumented hole expansion test*. Materials Science, 2009.
9. Panich, S. and K. Chongbunwatana, *Influence of anisotropic yield criteria on simulation accuracy of the hole-expansion test*. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 2020. **967**(1): p. 012037.
10. Leonhardt, A., V. Kräusel, and U. Paar, *Automated hole expansion test with pneumatic crack detection*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. **480**: p. 012026.
11. McCormick, N. and J. Lord, *Digital Image Correlation*. Vol. 13. 2010. 52–54.
12. Sutton, M.A., J.-J. Orteu, and H.W. Schreier, *Image correlation for shape, motion and deformation measurements*. 2009, New York, NY: Springer. 322.
13. Behrens, B.-A., et al., *Improving hole expansion ratio by parameter adjustment in abrasive water jet operations for DP800*. SAE Int. J. Mater. Manuf., 2018. **11**(3): p. 241-252.
14. Chen, X., et al., *Measurement of Strain Distribution for Hole Expansion with Digital Image Correlation (DIC) System*. 2011.
15. Li, J., H. Wang, and D.-w. Yan, *Influence of Experiment Methods on Limit Hole Expansion Ratio*. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2016.
16. Kremaszky, C., et al., *Towards More Efficient Hole Expansion Testing*. IDDRG 2014 Conference, 2014: p. 204–209.

17. Wang, K., M. Luo, and T. Wierzbicki, *Experiments and modeling of edge fracture for an AHSS sheet*. International Journal of Fracture, 2014. **187**(2): p. 245-268.
18. Barlo, A., et al., *A study of the boundary conditions in the ISO-16630 Hole Expansion Test*. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 2022. **1238**(1): p. 012031.
19. Oh, S.H., S.H. Yang, and Y.S. Kim, *A study of image processing based hole expansion test*, in *Testing and Measurement: Techniques and Applications*, K. Chan, Editor. 2015: Phuket Island, Thailand.
20. Pratt, W.K., *Digital Image Processing*. 4 ed. 2007, Nashville, TN: John Wiley & Sons. 808.
21. Gonzalez, R. and Z. Faisal, *Digital Image Processing Second Edition*. 2019.
22. Chiriac, C. and G. Chen, *Local Formability characterization of AHSS - digital camera based hole expansion test development*. IDDRG 2008 Conference, 2008: p. 16-18.
23. Kim, H., et al., *Development of new hole expansion testing method*. Journal of Physics: Conference Series, 2016. **734**: p. 032025.
24. Choi, S., et al., *Image Processing Algorithm for Real-Time Crack Inspection in Hole Expansion Test*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019. **20**(7): p. 1139-1148.
25. Park, J., et al., *Integrated machine vision system for evaluating hole expansion ratio of advanced high-strength steels*. Materials (Basel), 2022. **15**(2): p. 553.
26. Cruz, D.J., et al., *An Integrated Methodology for HER Determination in Hole Expansion Test*, in *Materials Design and Applications III*, L.F.M. da Silva, Editor. 2021, Springer International Publishing: Cham. p. 243-256.
27. Duarte, J.F., A.D. Santos, and A.B. Rocha, *Development of Testing Equipment for Sheet Metal Forming Analysis*. Recent Developments in Sheet Metal Forming Technology - 18th Biennial Congress, 1994.
28. Sousa, J. P. *Desenvolvimento de um Sistema de Controlo e Aquisição de Dados para Máquina Universal de Ensaios de Chapas Metálicas*. Master Thesis 2019, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.
29. Otsu, N., *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979. **9**(1): p. 62-66.
30. Bradley, D. and G. Roth, *Adaptive Thresholding using the Integral Image*. Journal of Graphics Tools, 2007. **12**(2): p. 13-21.
31. Atherton, T.J. and D.J. Kerbyson, *Size invariant circle detection*. Image and Vision Computing, 1999. **17**(11): p. 795-803.
32. Yuen, H.K., et al., *Comparative study of Hough Transform methods for circle finding*. Image and Vision Computing, 1990. **8**(1): p. 71-77.
33. Hough, P.V.C., *Method and Means for Recognizing Complex Patterns*. 1962.
34. Duda, R.O. and P.E. Hart, *Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures*. Commun. ACM, 1972. **15**(1): p. 11-15.
35. Smereka, M. and I. Dulęba, *Circular Object Detection Using a modified Hough transform*. Int. J. Appl. Math. Comput. Sci., 2008. **18**(1): p. 85-91.
36. Canny, J., *A Computational Approach to Edge Detection*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986. **PAMI-8**(6): p. 679-698.
37. Parker, J., *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. 1997.
38. Marques, A., et al., *Machine Learning for Predicting Fracture Strain in Sheet Metal Forming*. Metals, 2022. **12**: p. 1799.
39. Standardization), I.t.I.O.f., *Metallic materials — Tensile testing, in — Part 1: Method of test at room temperature*. 2016.
40. Li, W., et al., *Microstructural evolution and deformation behavior of fiber laser welded QP980 steel joint*. Materials Science and Engineering: A, 2018. **717**: p. 124-133.