Número do projeto 2020-1-PL01-KA202-081820

IO3 - Kit de Materiais Educativos para o Curso de Formação TEED Versão Pública – para Formandos

Estado do documento		
Versão	**Data**	**Descrição**
1	Dezembro-2022	*Versão preliminar – Proposta inicial*
2	Janeiro-2023	*Versão preliminar – para revisão*
3	Maio-2023	*Versão Final*

Cofinanciado pelo Programa Erasmus+ da União Europeia

Este projeto foi financiado com o apoio da Comissão Europeia. Esta publicação reflete apenas as opiniões do autor, e a Comissão não pode ser responsabilizada por qualquer uso que possa ser feito das informações nele contidas.

Índice

I. Introdução ao kit 3
II. Manual 4
1. Introdução aos Ensaios Destrutivos 4
1.1. Introdução aos Ensaios Destrutivos e Regras de Segurança em Ensaios Destrutivos 4
1.2. Design de Máquinas e Equipamentos para Ensaios Destrutivos 13
2. Ensaios Mecânicos (Ensaios de Tração, Ensaios de dobragem, Ensaios de Impacto Charpy, Ensaios de Fratura, Ensaios de Dureza) 21
2.1. Ensaios de tração de metais à temperatura ambiente 21
2.2. Ensaios de tração de juntas soldadas com soldas de topo a topo, juntas cruciformes, juntas sobrepostas e juntas com soldas de ângulo 35
2.3. Ensaios de dobragem de metais e juntas soldadas 45
2.4. Ensaio de impacto Charpy de metais e juntas soldadas 64
2.5. Ensaios de fratura de juntas soldadas 82
2.6. Ensaios de dureza de juntas soldadas 94
2.7. Exercícios para a sala de aula 100
3. Incerteza de medição 106
3.1. Métodos gerais de cálculo das incertezas 106
3.2. Incerteza de medição para ensaio de tração, ensaio de impacto e ensaio de dureza 112
3.3. Exercícios para a sala de aula 143

I. Introdução ao kit

Este IO3 é relativo ao desenvolvimento dos recursos necessários para a futura implementação da qualificação de Técnico Europeu de Ensaios Destrutivos (TEED) a nível nacional, e destina-se tanto a formadores/professores como a formandos e ao ANB (Organismo Autorizado Nomeado da EWF) para facilitar o processo de aprendizagem, e a transferibilidade da qualificação.

Este documento inclui o desenvolvimento de um Manual com ferramentas de formação e ferramentas de avaliação inovadoras (acesso restrito aos ANB nacionais da EWF), tais como recursos de aprendizagem baseada em problemas, bem como exercícios práticos para a sala de aula. O conteúdo deste Manual (ou seja, o kit de materiais educativos TEED) será pilotado em Eventos-piloto Nacionais com os grupos-alvo TRUST, para ter em conta quaisquer melhorias consideradas necessárias.

Todos os parceiros contribuíram para o desenvolvimento dos materiais educativos e estiveram envolvidos na elaboração de todos os instrumentos de avaliação a utilizar no Curso de Formação. Os parceiros do TRUST garantirão que os exercícios e as ferramentas de avaliação criados estejam totalmente alinhados com a área dos ensaios destrutivos, desenvolvendo estudos de caso reais e recursos de aprendizagem baseados em problemas de contextos industriais reais. Isto garantirá que os formandos inscritos no curso de formação TEED, tenham a oportunidade de resolver problemas que os profissionais que trabalham em Ensaios Destrutivos enfrentam diariamente, preparando-os, assim, melhor para abordar algumas dessas questões na vida real.

Embora os instrumentos de avaliação desenvolvidos tenham acesso restrito aos ANB Nacionais da EWF, serão traduzidos para estarem disponíveis nas línguas nacionais dos parceiros (PT, IT, PL e RO), bem como os exercícios práticos para a sala de aula, garantindo a sua correta aplicação a nível nacional aquando da implementação do curso de formação TEED. Está em consonância com as características harmonizadas da qualificação TEED, o que significa que todos os formandos têm acesso à mesma formação, aos mesmos exercícios e aos mesmos procedimentos de avaliação, independentemente dos seus contextos.

II. Manual

Por questões de confidencialidade, esta é a única parte do Kit de Materiais Educativos a que os formandos podem aceder. Estes materiais destinam-se a apoiar os formadores na entrega dos conteúdos técnicos do curso de formação TEED, para criar um ambiente de aprendizagem dinâmico baseado numa abordagem centrada no aluno. Ao mesmo tempo, os formandos podem utilizá-lo como um guia para aprofundar os estudos sobre os temas.

Está estruturado seguindo exatamente a mesma estrutura das 3 unidades de competência que fazem parte do Currículo TEED (desenvolvido no âmbito do IO2):

1. Introdução aos Ensaios Destrutivos
2. Ensaios Mecânicos (Ensaios de Tração, Ensaio de Curvatura, Ensaio de Impacto Charpy, Ensaio de Fratura, Ensaio de Dureza)
3. Incerteza de medição

1. Introdução aos Ensaios Destrutivos

1.1. Introdução aos Ensaios Destrutivos e Regras de Segurança em Ensaios Destrutivos

No mundo moderno, usamos muitos materiais diferentes para construir estruturas, componentes e máquinas. O *design* adequado desses itens requer um bom conhecimento das propriedades dos seus materiais constituintes, ou seja, propriedades mecânicas, como resistência à tração, rigidez, tenacidade, dureza e ductilidade.

Diferentes tipos de ensaios têm sido propostos para determinar essas propriedades, geralmente designados de ensaios mecânicos ou ensaios destrutivos, pois geralmente exigem a destruição da peça a ser testada. Como tal, estes testes são normalmente utilizados por amostragem e podem servir vários fins, nomeadamente:

- Determinar as propriedades do material necessárias para o *design* de componentes e estruturas.
- Receção de matérias-primas para confirmar a conformidade das suas propriedades com a especificação.
- Qualificação de alguns processos de fabricação ou junção. A soldadura é um exemplo típico e extremamente importante.
- Qualidade da produção das juntas de soldadura.
- Investigação de acidentes ou casos de falha.

- Investigação para o desenvolvimento de novos materiais ou novos processos de fabrico.

Ao longo do último século, centenas de testes mecânicos diferentes foram propostos para determinar ou analisar diferentes propriedades, a seção dois introduzirá vários testes frequentemente usados para determinar as propriedades básicas do material e com particular relevância na soldagem. Para melhor compreender estes ensaios, introduziremos de seguida alguns conceitos básicos relativos a ensaios e comportamento de materiais, particularmente de materiais metálicos, e juntas de soldadura.

1.1.1. Conceitos Básicos

A resistência mecânica de um determinado material é uma característica importante. No entanto, expressar isso como a carga máxima que o material pode suportar sem falhas não é prático porque uma peça mais espessa de material suportará uma carga maior. Outra propriedade ou parâmetro importante no ensaio mecânico é o alongamento de um determinado comprimento de material com uma determinada carga. Tal como acontece com a carga, utilizar o alongamento do material não é prático porque um pedaço de material mais longo terá um alongamento maior. Assim, em ensaios mecânicos e engenharia utilizamos os conceitos de tensão mecânica e deformação para quantificar estas propriedades dos materiais.

A tensão é definida como a carga aplicada ao pedaço de material dividida pela cruz resistente da peça. Esta é geralmente chamada de tensão direta ou tensão normal porque a secção transversal é perpendicular à força e representada pela letra grega sigma (σ). Na Figura 1.a) se F=20 kN e a secção transversal AA' for de 100 mm^2, então:

F=20 000N

AA'=10 mm^2=0,0001 m^2 e a tensão:

$$\sigma = \frac{20\,000}{0.0001} = 200000000\ {}^{N}/_{m} = 200000000\ Pa = 200\ MPa$$

Assim, a tensão mecânica tem as mesmas unidades que a pressão, Pascal (Pa) ou, mais frequentemente no comportamento dos materiais e múltiplos ensaios mecânicos deste, como kilopascal (kPa) ou megapascal (MPa).

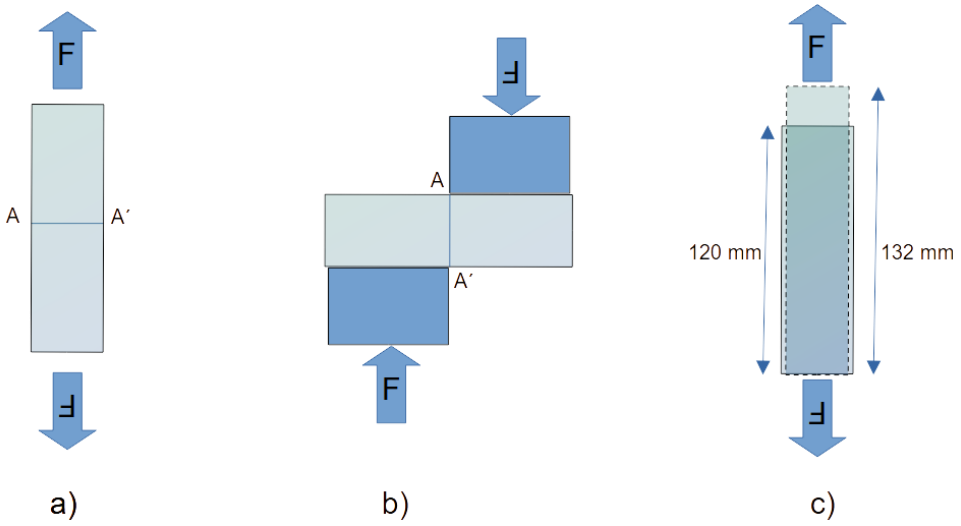


Figura 1 - Representação esquemática de tensões e deformações numa barra de material

Podemos também ter um tipo diferente de tensão onde a secção transversal resistente é paralela à força como exemplificado na Figura 1b), esta é denominada tensão de cisalhamento e representada pela letra grega tau (τ). Na Figura 1b) se a barra tiver a mesma secção transversal de 100 m^2 e a força for também de 20 kN, então a tensão de cisalhamento na secção AA' será também de 200 MPa.

A tensão é definida como o alongamento da peça (aumento ou diminuição do comprimento) dividido pelo comprimento original da peça, muitas vezes expresso como uma percentagem, e representado pela letra grega épsilon (ε). No exemplo da Figura 1 c), se o comprimento inicial da barra é de 120 mm=0,12 m e o comprimento final sob uma força de tração F é de 132 mm=0,132 m, então a deformação é:

$$\frac{0.132 - 0.120}{0.120} = 0.1\,{}^{m}/_{m}$$

Ou multiplicando por 100 para converter em percentagem 0,1x100%=10%

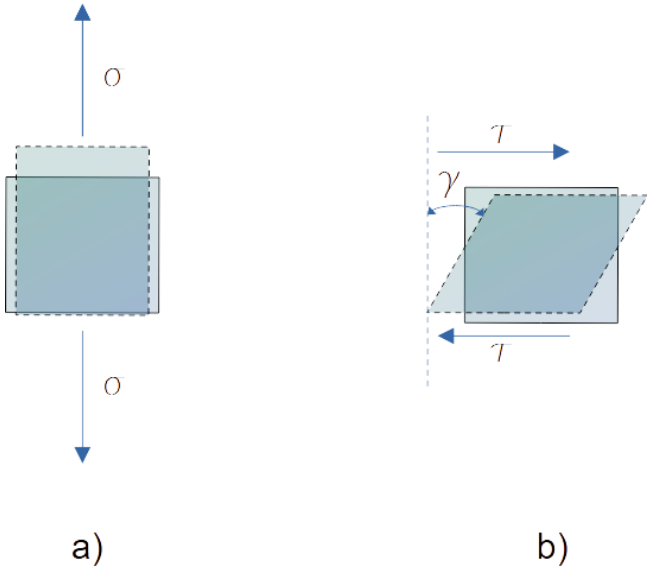


Figura 2 - Representação esquemática de tensões diretas e de cisalhamento

Da mesma forma, tensões de cisalhamento também causarão uma tensão, geralmente denotada pela letra grega gama (γ), embora esta tensão seja mais difícil de visualizar. Enquanto as tensões normais causam apenas um estiramento de uma determinada forma, as tensões de cisalhamento causam uma distorção da forma original, como exemplificado na Figura 2b), onde um quadrado se torna um losango. Fisicamente, a tensão de cisalhamento é o ângulo de distorção mostrado na Figura 2b).

É experiência comum que alguns materiais, como a borracha, por exemplo, podem ser esticados até um comprimento maior aplicando uma força, mas quando libertados, o material recupera o seu comprimento original, enquanto outros materiais, um fio de cobre, por exemplo, quando dobrado ou esticado manterá a forma/comprimento deformado após ser libertado. O primeiro comportamento é chamado de deformação elástica, enquanto o segundo é denominado deformação plástica. De facto, a maioria dos materiais, nomeadamente as ligas metálicas, apresentam ambos os comportamentos. São elásticos até um certo nível de tensão e tornam-se plásticos a partir daí e até ao ponto de stress em que se fraturam. A tensão na qual o comportamento muda de elástico para plástico é denominada tensão de rendimento e a tensão na qual ocorre falha de tensão de fratura ou resistência à tração. O conhecimento destas tensões é muito importante para uma utilização fiável de materiais e processos tecnológicos como a soldadura. O teste de tração que será introduzido em detalhe na seção 2 permite determinar com precisão essas propriedades importantes.

Os materiais que apresentam o comportamento acima, com considerável deformação plástica antes da falha, são denominados materiais dúcteis. Existem outros materiais, exemplos clássicos são cerâ-

micas e vidros, que se fraturam quando ainda estão em regime elástico ou com pouquíssima deformação plástica, estes são chamados de materiais frágeis. Quebradiço não significa necessariamente "mais fraco" no sentido comum da palavra, na verdade, muitos materiais de alta resistência, como aços para ferramentas ou aços de alta velocidade (frequentemente usados para fazer ferramentas para cortar ou manipular outros materiais) mostram esse comportamento. A principal diferença está na energia necessária (ou absorvida) para fraturar o material. Como a deformação elástica é muito pequena em comparação com a plástica, a energia absorvida na fratura de materiais frágeis também é pequena, apesar de ter maior stress de fratura. Apesar de ter uma menor tensão de fratura, os materiais dúcteis absorverão mais energia para fraturar devido à deformação plástica muito maior.

Isso leva a outro conceito, ou propriedade mecânica, chamado dureza. Um material de alta tenacidade é um material que absorve um alto valor de energia para fraturar. Isso não significa que os materiais de alta tenacidade sejam melhores do que os de baixa tenacidade, depende da aplicação para a qual queremos usá-los. Se martelarmos um pedaço de aço de construção ele vai dobrar e deformar, mas não vai quebrar, por outro lado, se fizermos o mesmo com uma broca, feita de aço de alta resistência, ela pode quebrar facilmente ou até mesmo se quebrar em vários pedaços. Uma broca em aço de construção se desgastaria e perderia suas arestas de corte muito rapidamente, enquanto uma ponte feita de aço de alta resistência, além do custo muito alto, seria muito sensível a impactos e defeitos que poderiam se desenvolver em serviço, e poderia desabar sem qualquer aviso prévio.

A tenacidade do material pode ser derivada de um ensaio de tração, mas isso não é comum. Como esta propriedade é muito importante, especialmente em materiais de construção, testes específicos foram propostos para determiná-la. O mais utilizado é o ensaio de impacto Charpy V, no qual uma amostra entalhada é quebrada por um impacto. Ao extrair cuidadosamente a peça de teste, podemos posicionar o entalhe numa determinada região do nosso material, para sondar um local específico e não todo o volume dele. Um bom exemplo é uma junta de soldadura (Figura 3), nela podemos distinguir pelo menos três regiões:

- Metal base – material distante da solda e não afetado pelo ciclo de calor da solda.
- Metal de solda – material que foi derretido e solidificado novamente para unir ambas as partes.
- Zona afetada pelo calor (HAZ) – região adjacente ao metal de solda que, apesar de não derreter, foi submetida a temperaturas muito elevadas, e sofre modificações estruturais devido a isso.

A última região é geralmente a mais problemática porque o efeito dissipador do calor do resto do componente pode causar altas taxas de arrefecimento nesta região da solda e, consequentemente, a

formação de estrutura dura ou fases. Como mencionado anteriormente, as fases duras são geralmente frágeis, o que pode comprometer a resistência mecânica da junta de solda. O teste de impacto é muito útil e, portanto, muito usado para controlar as propriedades da HAZ e certificar-se de que o procedimento de soldagem (ou o soldador) não estão a causar esse problema. A Figura 3 também mostra, esquematicamente, o posicionamento de uma amostra de ensaio de impacto para sondar as propriedades da HAZ. Como o entalhe está posicionado nesta região, conseguimos determinar as propriedades da HAZ e não as de toda a junta soldada.

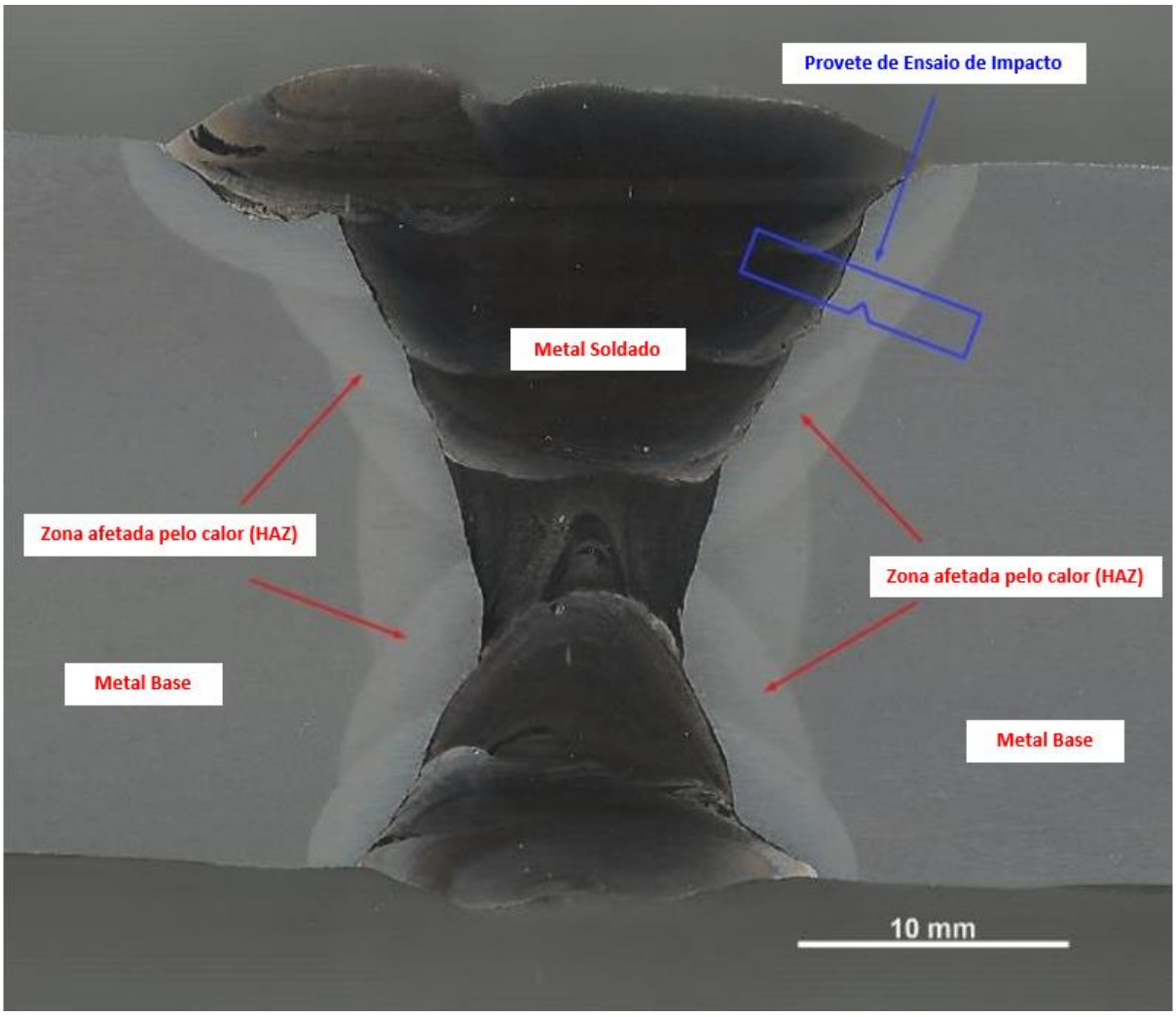


Figura 3 - Macrografia de uma junta de solda mostrando as diferentes regiões e uma possível localização de uma amostra de impacto para testar a HAZ.

O último conceito ou propriedade em relação às propriedades mecânicas e ensaios é a dureza. Esta é uma propriedade muito importante por si só, mas também por causa de sua relação com outras propriedades dos materiais. Na nossa experiência de vida diária, estamos familiarizados com o conceito de dureza, instintivamente tem-se a noção de que, por exemplo, a borracha é mais macia do que o

metal ou o vidro. No entanto, para usar isso na engenharia, precisamos de uma maneira mais quantitativa de definir e medir essa propriedade. A primeira tentativa foi a escala de Mohs proposta para o estudo de minerais. Esta escala consiste em dez minerais, começando com talco (o mais macio) e com dureza crescente até o diamante (o mais duro). Se algum material é riscado por um dos minerais é mais macio do que esse mineral, se não é mais duro. Embora ainda seja usada em mineralogia, esta escala não é muito útil na avaliação da dureza de materiais de engenharia contemporâneos. Tem apenas dez graus de dureza e a diferença entre esses graus não é constante, por isso a discriminação que podemos obter entre diferentes materiais é muito pequena. As técnicas modernas para medir a dureza de um material são baseadas no que chamamos de dureza de indentação. Nestas técnicas, um indentador com uma ponta dura de determinada geometria padrão é pressionado contra a superfície do material que está sendo testado com uma carga padrão e por um certo tempo. A dureza é avaliada pelo tamanho da marcação deixada na superfície, ou pela profundidade que o golpe penetra no material. De acordo com isso, a dureza pode ser definida pela resistência do material à deformação plástica. Tal como acontece com os ensaios de impacto, os ensaios de dureza, para além dos materiais de ensaio em geral, são muito utilizados na soldadura porque também são muito localizados, a largura da marca é menor, ou muitas vezes muito menor do que um milímetro, assim podem sondar determinadas regiões do material na junta de soldadura, a Figura 4 mostra reentrâncias de dureza nas diferentes regiões de uma junta soldada. Uma vez que a dureza está relacionada com a capacidade do material de se deformar plasticamente, não é independente de outras propriedades do material que discutimos anteriormente. Assim, como regra geral, um material duro será frágil, e mostrará alta resistência e baixa tenacidade e, inversamente, um material mais macio será dúctil e exibirá baixa resistência e alta tenacidade.

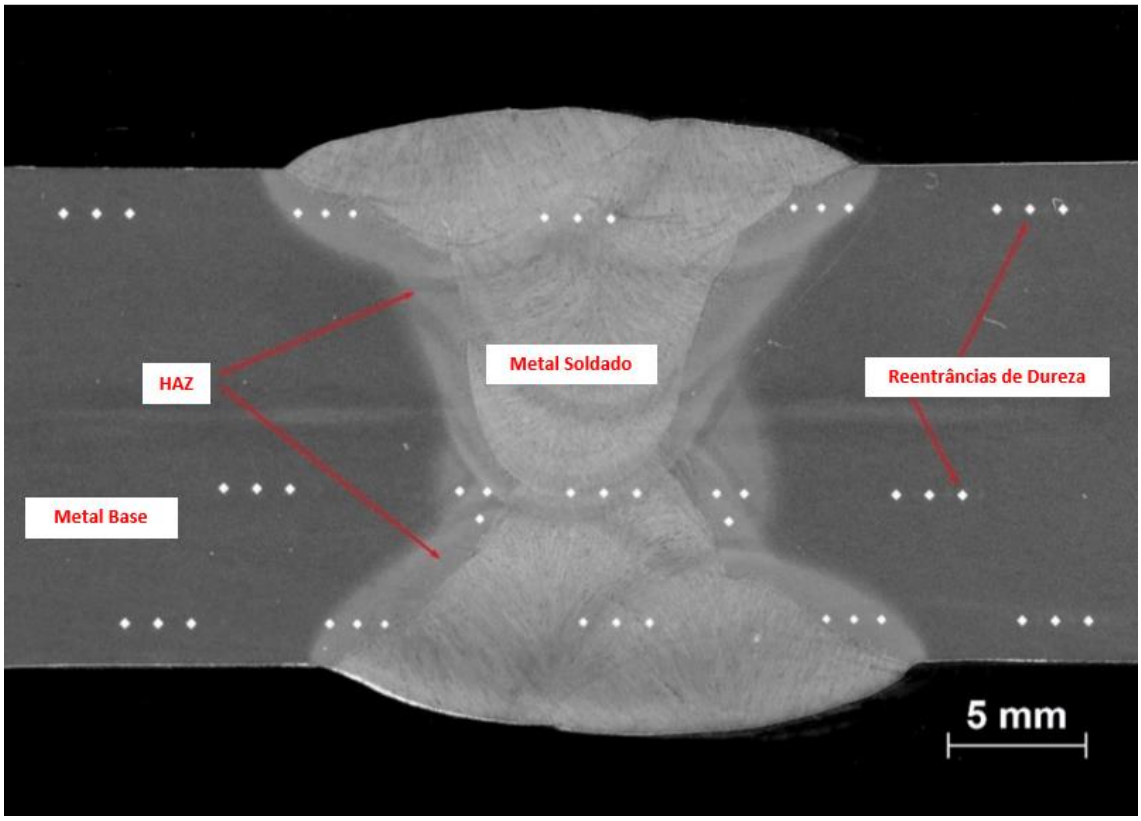


Figura 4 - Reentrâncias de dureza numa junta de solda.

1.1.2. Aspetos de segurança

Os ensaios mecânicos não são, em geral, particularmente perigosos, no entanto, com o decorrer da maioria dos trabalhos laboratoriais podem ocorrer lesões graves e danos se as operações de ensaio necessárias não forem realizadas de acordo com os procedimentos adequados e o devido cuidado.

Os riscos e aspetos de segurança relacionados com os testes mecânicos podem ser divididos em três classes: equipamento, operador e meio ambiente. Estes diferentes aspetos não são independentes uns dos outros e estão frequentemente interligados.

- Segurança dos equipamentos – O bom funcionamento dos equipamentos é um requisito fundamental para garantir a segurança do laboratório de ensaios. Assim, o operador deve ter formação adequada sobre o funcionamento dos equipamentos, os seus princípios de funcionamento e conceção (iremos desenvolver esta questão mais detalhadamente na Secção 1.2). O funcionamento inadequado do equipamento de ensaio pode também causar danos às próprias amostras de ensaio, com a consequente baixa qualidade e fiabilidade dos resultados obtidos. Todos os equipamentos devem ser instalados e verificados de acordo com as instruções do fabricante e com, por exemplo, alimentação elétrica, ventilação e espaço adequados

para serem operados com segurança. O laboratório deve igualmente dispor de procedimentos adequados de manutenção e verificação do equipamento de ensaio. A instalação/funcionamento inadequado do equipamento pode potenciar todos os outros riscos.

- Segurança do operador – os operadores muitas vezes precisam manipular peças pesadas para executar a configuração do equipamento, como peças de teste pesadas e/ou provetes de teste, o uso de calçado de proteção adequado deve ser altamente recomendado ou mesmo obrigatório. Da mesma forma, o uso de luvas de proteção mecânica também é altamente recomendado, muitas peças de teste podem ter contornos afiados ou lascas residuais das operações de maquinação que podem causar cortes e hematomas. No entanto, durante a configuração do ensaio é muitas vezes necessário fazer algumas medições usando pinças ou "chanfros em V" que podem ser difíceis de executar com luvas pesadas, portanto, luvas mais finas, como as de látex, também devem estar disponíveis. Alguns ensaios, particularmente aqueles que são realizados em materiais frágeis ou compósitos, podem quebrar em várias peças ou projetar microfibras, pelo que a utilização de alguma proteção ocular ou facial também é altamente recomendado. Este tipo de proteção também pode ser necessário quando se realizam ensaios de impacto a temperaturas abaixo da temperatura ambiente. Estas temperaturas são geralmente atingidas com banhos criogénicos ou azoto líquido que podem derramar-se causando queimaduras ou lesões oculares. Produtos químicos perigosos ou agressivos não são comuns em um laboratório de ensaios mecânicos, mas algumas soluções à base de ácido podem ser necessárias às vezes, bem como produtos desengordurantes que podem ser irritantes em contato com a pele. Luvas de látex ou similares também devem estar disponíveis para estas situações.
- Segurança ambiental – Como mencionado anteriormente, um laboratório de ensaios mecânicos não funcionará, em geral, com materiais particularmente perigosos. No entanto, alguns produtos químicos podem ter de ser manuseados e, especialmente, no caso de o laboratório operar equipamento hidráulico, grandes quantidades de óleo hidráulico podem ter de ser eliminadas periodicamente. Estas substâncias podem representar perigos potenciais tanto para o pessoal de laboratório como para o ambiente. A equipa deve ter formação adequada sobre como manusear e armazenar esses materiais, enquanto o laboratório deve ter procedimentos adequados de gestão de resíduos dessas substâncias, geralmente, contratando uma empresa especializada para aas reciclar ou destruir corretamente.

1.2. Design de Máquinas e Equipamentos para Ensaios Destrutivos

Para realizar um ensaio mecânico ou destrutivo necessitamos sempre de um equipamento com uma peça móvel para aplicar as cargas necessárias e uma peça fixa para suportar ou segurar a peça de ensaio. Estes últimos devem, evidentemente, ser capazes de resistir às cargas aplicadas sem deformações apreciáveis. Discutiremos a seguir os principais princípios de projeto e características de três tipos de equipamentos que são representativos da maioria das situações relativas ao teste mecânico:

- Máquinas de tração - carga de tração aplicada progressivamente até a falha.
- Máquinas de impacto - carga aplicada instantaneamente por um impacto.
- Máquinas de dureza - carga de compressão aplicada progressivamente.

As máquinas de ensaio de tração são provavelmente o equipamento de teste mecânico mais utilizado, apesar do nome, elas também podem ser usadas para muitos outros tipos de testes mecânicos, na verdade, às vezes são chamadas de máquinas de ensaio universais. Estas máquinas podem ser divididas em dois tipos: eletromecânicas, em que a força é aplicada por um motor elétrico, e servo-hidráulicos, em que a força é gerada por um macaco hidráulico ou atuador. Apesar das diferenças inerentes ao método de condução específico de cada tipo de máquina, o design básico é semelhante. Precisamos ter uma estrutura de carga para permitir que a força seja aplicada à amostra, alguns meios para agarrar a amostra na estrutura de carga e sensores para adquirir os dados de teste de que precisamos.

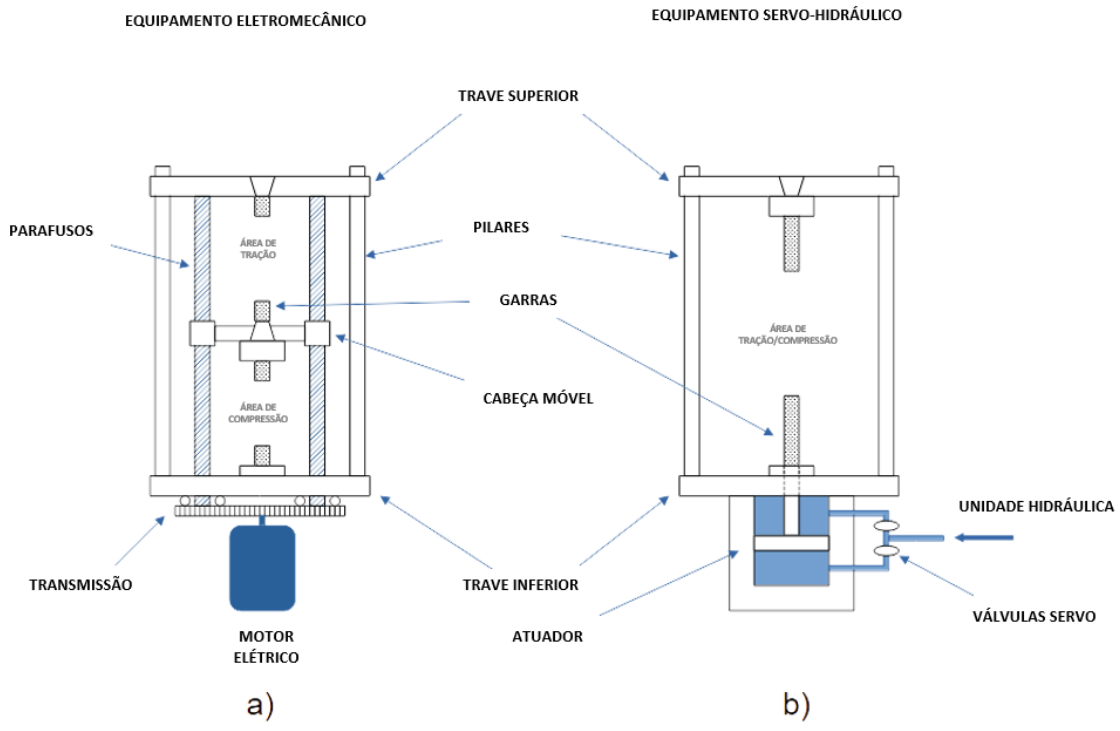


Figura 5 - Representação esquemática do design dos principais equipamentos de ensaio de tração.

As máquinas eletromecânicas consistem basicamente em duas colunas verticais de aço, paralelas uma à outra e conetadas nos lados superior e inferior por barras transversais rígidas e estáticas, Figura 5a) (algumas máquinas de grande capacidade podem ter uma configuração horizontal, mas isso não é comum). Paralelamente às barras verticais existem duas barras roscadas, ou parafusos, que podem girar acionados por um motor elétrico geralmente localizado abaixo da estrutura de carga da máquina. Estes parafusos podem acionar o movimento de uma barra transversal móvel, geralmente chamada de cabeça cruzada. Esta configuração da máquina pode ter uma única área de teste na qual a amostra de teste é agarrada entre a cabeça transversal e uma das barras transversais, ou duas áreas de teste, uma abaixo da cabeça transversal, geralmente para testes de compressão, dobragem, e similares envolvendo cargas de compressão, e outra área de teste acima da cabeça transversal especificamente para ensaios de tração. Esta é a configuração representada na Figura 5a), enquanto na Figura 6b) é mostrada uma única máquina de área de ensaio.

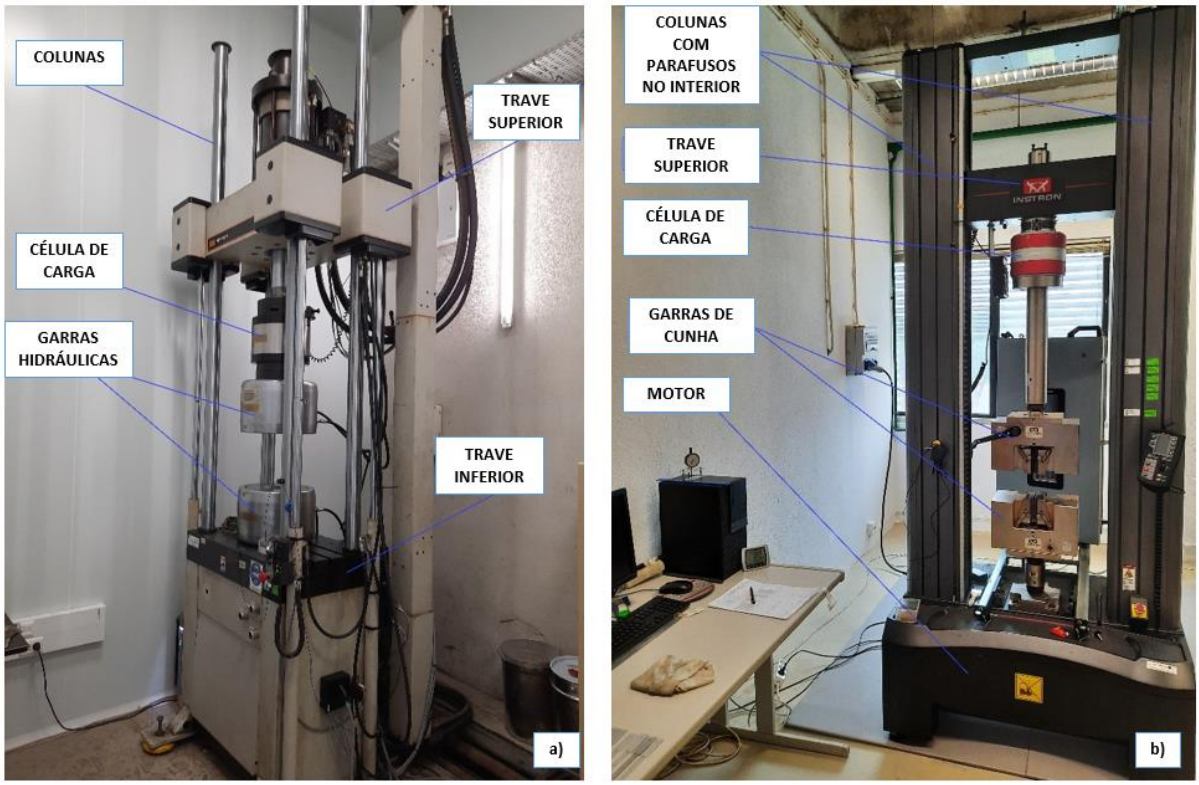


Figura 6 - Máquinas de ensaio mecânico; a) hidráulica tipo quatro colunas equipadas também com pegas hidráulicas; b) eletromecânica equipado com garras do tipo cunha manual.

Os equipamentos hidráulicos têm uma estrutura de carga semelhante aos equipamentos eletromecânicos, mas têm um atuador hidráulico na barra transversal superior ou inferior para aplicar a carga, Figura 5b). Ao contrário dos equipamentos eletromecânicos, onde a configuração de duas colunas é mais comum, as máquinas hidráulicas, especialmente as de grande capacidade, geralmente têm quatro colunas, Figura 6a). Embora designs mais antigos deste tipo de máquinas também pudessem ter duas áreas de teste, atualmente é mais comum ter a configuração com uma única área, Figura 5a) e Figura 6a).

Para a realização dos ensaios, as máquinas de ensaio devem ter na sua conceção outras peças ou acessórios comuns a todas as máquinas, independentemente do tipo de sistema de condução. Todos os designs de equipamentos devem incorporar um sistema para segurar a amostra na máquina, e esse sistema deve ser robusto o suficiente para suportar as cargas de teste necessárias. Como os testes mecânicos são baseados na aplicação de carga à amostra, o design do equipamento também deve incluir um sensor para medir a carga que está sendo aplicada durante o teste. Vários sistemas foram usados no passado, mas hoje em dia, este sensor é uma célula de carga integrada no conjunto de carga da máquina.

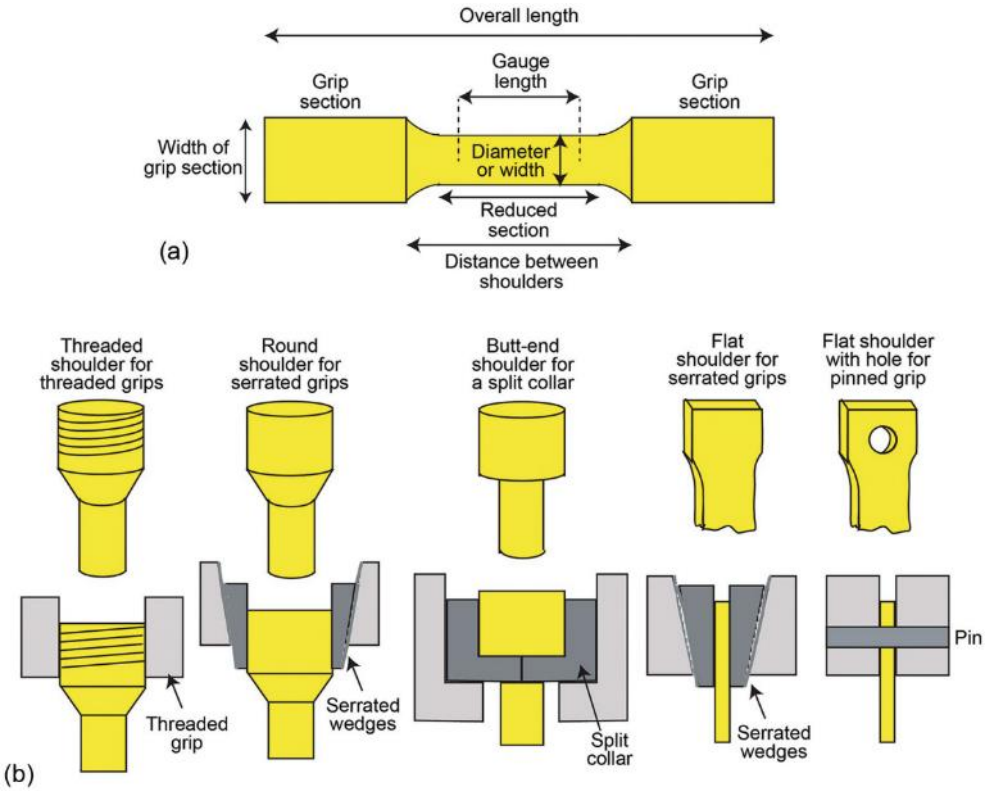
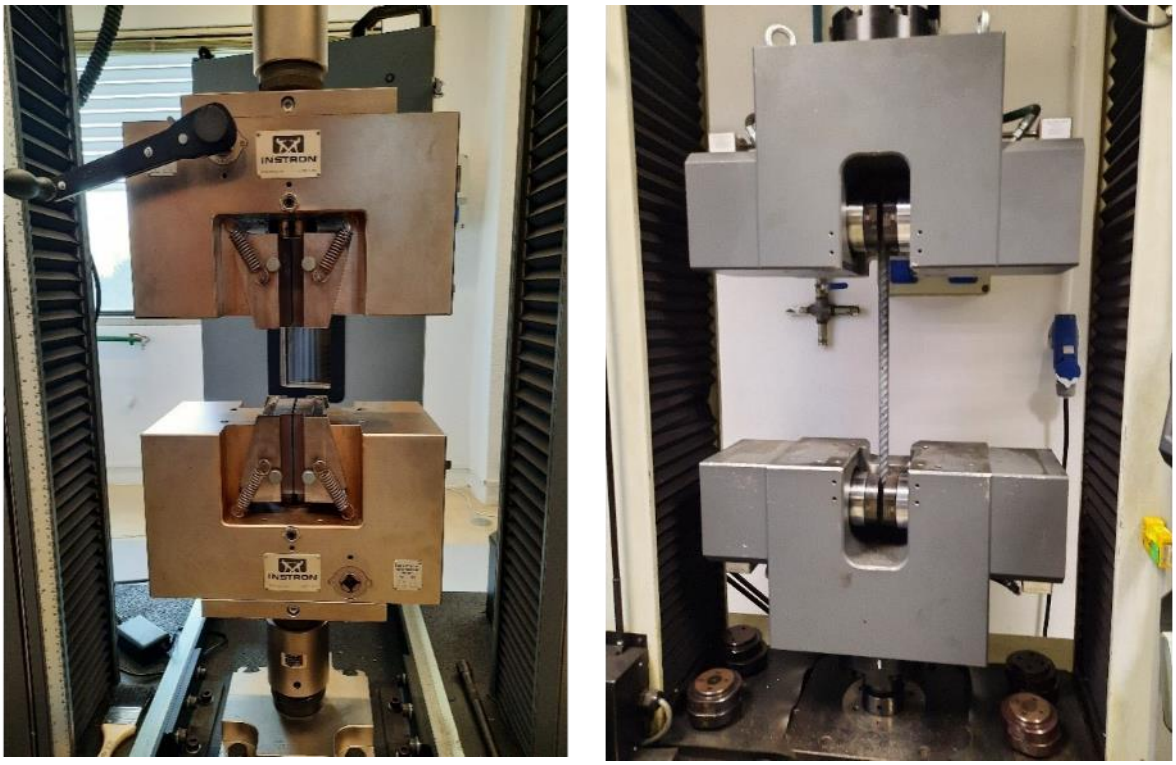


Figura 7 - Diferentes métodos de preensão de amostras.
https://static.cambridge.org/binary/version/id/urn:cambridge.org:id:binary:20210415111914621-0122:9781108943369:83789fig5_1.png?pub-status=live; Consultado o 15-03-23

A Figura 7 mostra esquematicamente alguns dos designs de aderência mais comuns. Estes são geralmente sistemas hidráulicos Figura 8b) ou sistemas mecânicos Figura 8a). O primeiro é mais flexível, uma vez que a força de preensão pode ser ajustada ao ensaio que está a ser realizado. As mecânicas consistem em duas cunhas serrilhadas (às vezes referidas como punhos de cunha) que deslizam sobre uma superfície fixa inclinada. Desde que não haja deslizamento da amostra, a força de preensão aumenta com a carga de tração.



a) *b)*

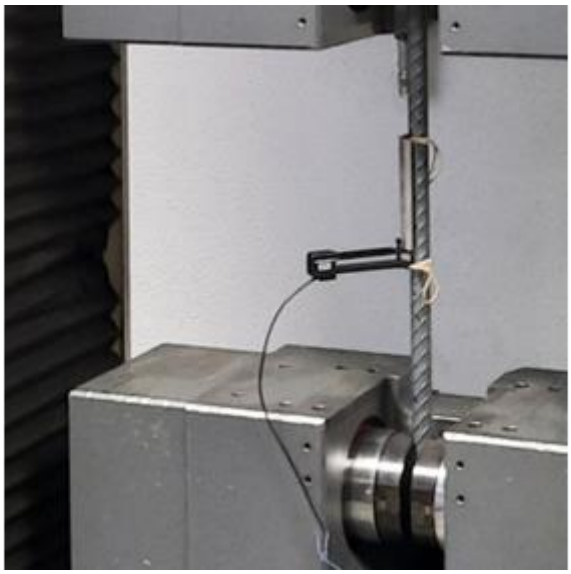
Figura 8 - Dois exemplos de pegas de máquinas de ensaio mecânico; a) tipo cunha mecânica; b) hidráulica.

Finalmente, todos os designs modernos de máquinas incorporam um transdutor de carga para monitorar as cargas aplicadas à amostra durante o ensaio. Diferentes tipos de transdutores foram usados no passado, mas os designs modernos dependem de uma célula de carga dentro do conjunto de carga da máquina, conectada à barra transversal fixa ou à cabeça transversal/pistão móvel, Figura 6. Os equipamentos de ensaio atuais também incluem um transdutor de deslocamento conectado à cabeça transversal ou pistão hidráulico para monitorar sua posição e movimento durante a configuração e o próprio ensaio.

Para realizar muitos testes mecânicos (e particularmente ensaios de tração), o sensor de deslocamento da máquina não é preciso o suficiente, pois também mede a deformação da própria máquina. Embora não faça parte do design da máquina, um transdutor adicional é necessário para realizar testes precisos. Trata-se de um extensómetro, que nos permite medir a deformação ou deformação real da própria amostra de ensaio. Atualmente, existem vários tipos disponíveis, incluindo laser sem contato e correlação de imagem de vídeo, mas o mais comum é um sistema mecânico composto por dois braços com bordas de faca, presos ao corpo da amostra com grampos, molas ou até mesmo cordas elásticas. A Figura 9 mostra exemplos desses extensómetros mecânicos, um deles ligado a uma amostra de vergalhão durante um teste.



a)



b)

Figura 9 - Dois exemplos de extensómetros de contacto mecânico. Em b) o extensómetro é fixado a um vergalhão com cordas elásticas durante um ensaio.

Os ensaios de impacto são geralmente realizados em máquinas que dependem da gravidade para aplicar o impacto na amostra de ensaio. O desenho mais comum é a configuração pendular inicialmente proposta no início do século XX e ainda hoje utilizada. Este design consiste numa base muito pesada (geralmente uma laje de betão e placas de aço pesadas). Pilares verticais são instalados nesta base para suportar um braço oscilante com um martelo pesado na final. O espécime é apoiado por uma bigorna na parte inferior da máquina, no caminho do martelo e numa posição que o entalhe está alinhado com a borda de impacto do martelo. Quando o pêndulo é libertado sem qualquer espécime na máquina, irá balançar todo o caminho para o outro lado e subir até à mesma altura a partir da qual foi libertado; Se um espécime estiver na máquina, o movimento do pêndulo será retardado ao atingir

o espécime e subir a uma altura mais baixa. A diferença de energia potencial correspondente à diferença de altura é a energia absorvida para fraturar a amostra. A Figura 10 mostra esquematicamente o princípio de funcionamento desta máquina. Esta conceção manteve-se praticamente inalterada desde que o ensaio de impacto foi proposto pela primeira vez. Os principais desenvolvimentos diziam respeito ao modo de funcionamento e à leitura da energia. Os modelos mais antigos eram operados manualmente usando um braço auxiliar operado por um virabrequim para elevar o pêndulo à sua altura de lançamento e a leitura de energia era feita por um mostrador com duas agulhas, uma girando junto com o pêndulo que arrastava o outro; quando o pêndulo atinge a sua altura máxima após o impacto e cai para trás, a agulha arrastada permanece na posição máxima, indicando a energia. As máquinas modernas são geralmente controladas por computador com braços de posicionamento totalmente automáticos uma leitura de energia digital. A Figura 11 mostra um modelo antigo e um modelo moderno.

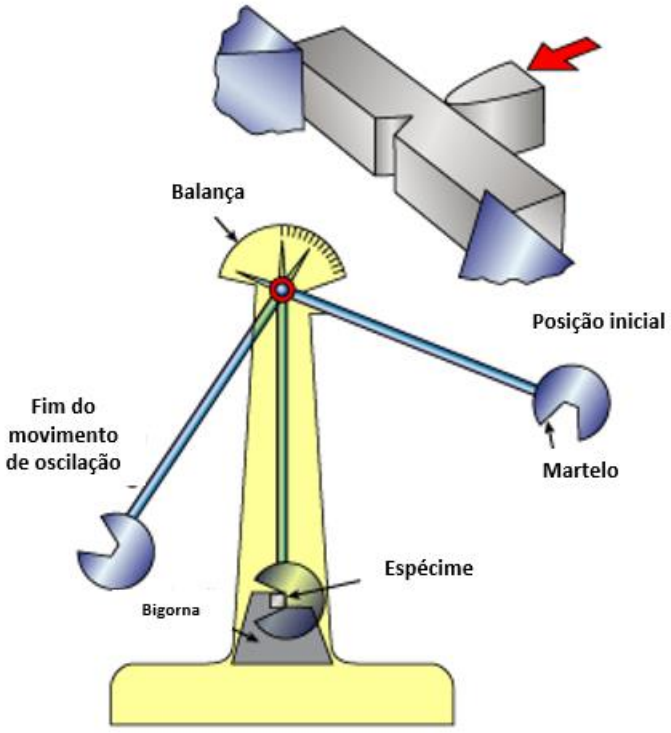


Figura 10 - Representação esquemática de um pêndulo de ensaio de impacto e de uma amostra na posição de ensaio. https://www.twi-global.com/images/00022/9757.gif; *Consultado a 28-03-2023*



a) *b)*

Figura 11 - Exemplos de pêndulos de teste de impacto; a) equipamento informático moderno, totalmente fechado para segurança; b) equipamentos manuais mais antigos, com proteção apenas parcial.

Tal como no ensaio de impacto, técnicas modernas de ensaio de dureza começaram a ser desenvolvidas no final do século XIX e início XX e o projeto básico da máquina permanece praticamente inalterado até hoje. Presentemente, estão a ser feitos grandes desenvolvimentos no controlo e medição dos ensaios, que são muitas vezes totalmente automáticos e informatizados, embora os manuais continuem a ser utilizados com frequência. As principais características deste tipo de equipamento são uma plataforma sólida e rígida para suportar a amostra a ser testada (esta plataforma tem geralmente um sistema de elevação como um parafuso para ajustar a altura ao tamanho da amostra); uma base com alguma geometria (como uma esfera, um cone ou uma pirâmide); um sistema de carga para pressionar o indentador contra a superfície da amostra e um pequeno microscópio que pode ser intercambiado com o indentador e permite escolher o local certo antes do ensaio e medir o tamanho da indentação deixado na superfície após o teste. Entre as várias técnicas utilizadas no presente para medir a dureza, uma baseia-se na profundidade que o indentador penetra na superfície do material e não no tamanho da marca deixada sobre ele, mas os demais princípios ainda se aplicam, sendo comum que uma máquina possa executar várias dessas técnicas. A Figura 10 mostra um esquema de máquina de ensaio de dureza, enquanto a Figura 13 mostra um modelo totalmente manual e um modelo moderno totalmente automático.

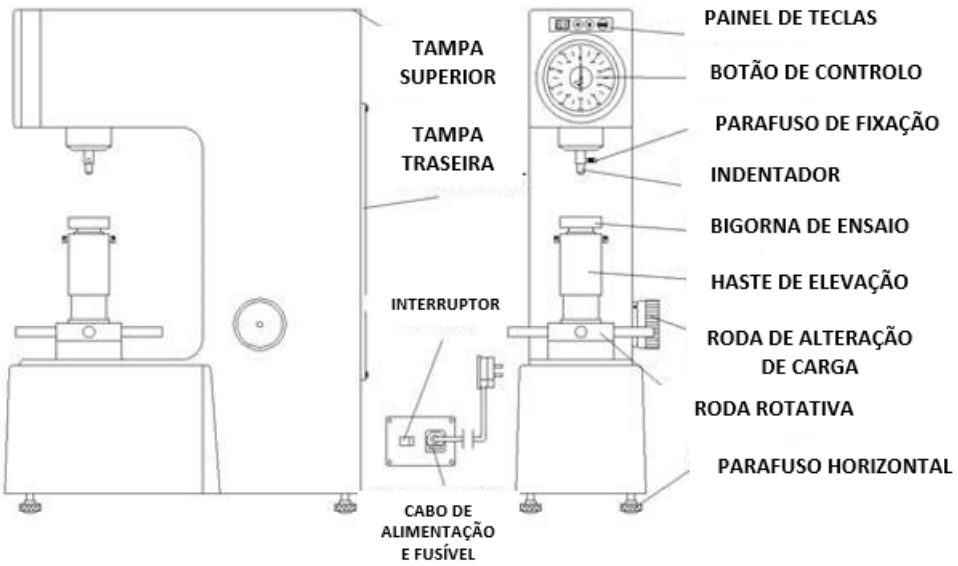
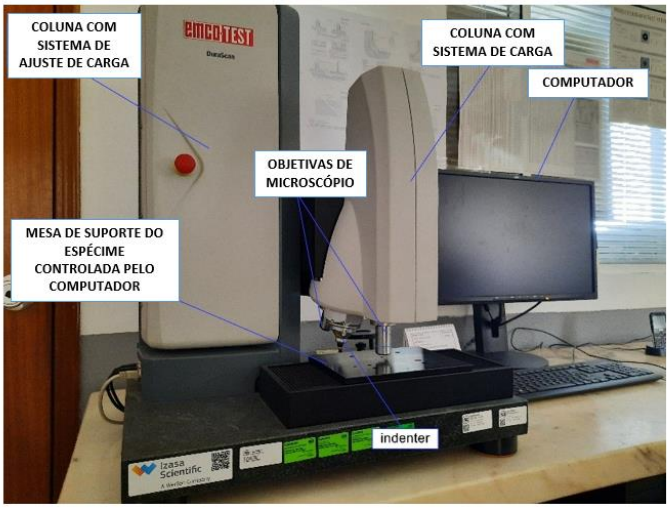


Figura 12 - Representação esquemática de uma máquina de teste de dureza (durómetros).
https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-Vickers-Hardness-Test-7_fig5_338430669; Consultado a 20-03-2023





a) *b)*

Figura 13 - Exemplos de durómetros a) equipamentos operados manualmente; e b) equipamento totalmente automático (informatizado).

2. Ensaios Mecânicos (Ensaios de Tração, Ensaios de dobragem, Ensaios de Impacto Charpy, Ensaios de Fratura, Ensaios de Dureza)

2.1. Ensaios de tração de metais à temperatura ambiente

2.1.1.1. Introdução

O ensaio de tração é o tipo de ensaio básico para metais com aplicações de engenharia e permite determinar as propriedades básicas dos materiais. O ensaio envolve o estiramento axial de amostras de uma forma específica nas pegas de um equipamento de ensaio. As amostras utilizadas para o ensaio podem ser divididas numa parte de tração e numa parte de preensão. Nas amostras utilizadas para este ensaio, existe uma secção de medição para ensaios de tração e uma secção de preensão para preensão e transferência de carga. Geralmente, são usadas amostras cilíndricas ou planas para a realização de ensaios de tração.

O ensaio de tração é realizado movendo uma das mandíbulas a uma velocidade constante ou a uma taxa constante de acumulação de carga. Durante o ensaio, regista-se a dependência do aumento do comprimento do manómetro em relação à força de tração e, no final do ensaio de tração, determinam-se as propriedades de resistência. A forma do gráfico resultante depende do tipo e condição do material a ser testado. Para aços de baixo carbono e metais com alta ductilidade, são geralmente obtidos gráficos com um ponto de rendimento pronunciado, enquanto para materiais de alta resistência, sem um ponto de rendimento pronunciado. A partir do momento em que a carga é aplicada, o alongamento da amostra aumenta em proporção direta à força de carga até que o chamado ponto de rendimento (limite elástico) seja atingido. Depois de exceder o limite proporcional, observa-se um aumento claro no alongamento da amostra em constante ou a observação da flutuação da amostra a um nível constante ou flutuante da força de carga. Isto corresponde à força de rendimento Re. Com um aumento adicional na elongação, verifica-se um aumento na força, mas este já não é proporcional à faixa de deformação elástica. Quando a força máxima - Fm - é atingida, desenvolve-se uma constrição local do espécime, chamada pescoço. Esta é a causa da diminuição lenta da força. No final do ensaio, a amostra parte-se. Após a quebra da amostra, o comprimento do calibre e as dimensões do pescoço local.

2.1.1.2. Descrição do procedimento de ensaio de tração

O objetivo do procedimento é garantir que o ensaio de tração de metais seja realizado corretamente. O procedimento especifica o método de ensaio de tração de materiais metálicos e define as propriedades mecânicas que podem ser determinadas à temperatura ambiente.

O procedimento foi redigido com base na norma EN ISO 6892-1.

2.1.1.2.1. Princípio

O ensaio consiste em esticar a amostra utilizando uma força de tração, geralmente para fraturar, para determinar propriedades mecânicas como:

- **Percentagem de alongamento após fratura – A**

  Alongamento permanente do comprimento do dispositivo após fratura, expresso em percentagem do comprimento original do dispositivo

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

  em que

  L_u – comprimento do dispositivo final após fratura,

  L_0 – comprimento original do dispositivo.

  Para a determinação manual do alongamento após a fratura A, cada extremidade do comprimento original do dispositivo L_0 deve ser marcada por meio de marcas finas, linhas escrivadas ou marcas perfuradas, mas não por marcas que possam resultar numa fratura prematura. O comprimento do dispositivo original deve ser marcado com uma precisão de ±1 %.

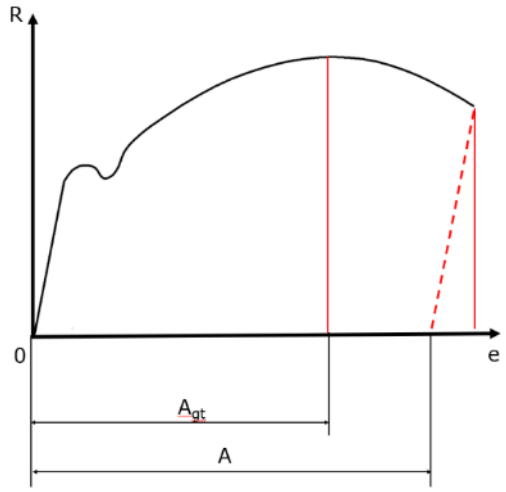
  Para provetes proporcionais, o valor calculado do comprimento do dispositivo inicial pode ser arredondado para o múltiplo mais próximo de 5 mm, desde que a diferença entre o comprimento do dispositivo calculado e o comprimento do dispositivo marcado seja inferior a 10 % de L_0.

  Se o comprimento paralelo L_c for muito superior ao comprimento do dispositivo original, como, por exemplo, no caso de provetes não maquinados, pode ser marcada uma série de comprimentos de dispositivo sobrepostos.

  Em alguns casos, pode ser útil traçar uma linha paralela ao eixo longitudinal, ao longo da qual os comprimentos do dispositivo são marcados.

- **Percentagem de extensão total à força máxima - A_{gt}**

Extensão total (elástica mais extensão plástica) à força máxima, expressa em percentagem do comprimento do extensómetro Le (comprimento inicial do manómetro utilizado para medir a extensão).



e – extensão percentual – deformação, expressa em percentagem do comprimento do extensómetro,

R – stress,

A_{gt} – Percentagem de extensão total à força máxima,

A - Percentagem de alongamento após fratura

Figura 14: Exemplos de extensão [1].

- **Redução percentual de área – Z**

Alteração máxima da área da secção transversal ocorrida durante o ensaio, expressa em percentagem da área da secção transversal original.

$$Z = \frac{Z_0 - Z_u}{Z_0} \cdot 100\%$$

em que

S_u – área da secção transversal mínima após fratura,

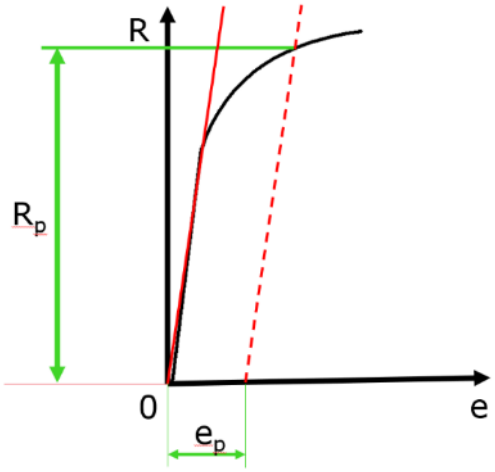
S_0 – área da secção transversal original do comprimento paralelo.

- **Resistência à prova, extensão plástica, R_p**

Tensão na qual a extensão plástica é igual a uma percentagem especificada do comprimento do extensómetro.

É adicionado um sufixo ao subscrito para indicar a percentagem prescrita, por exemplo, $R_{p0,2}$

Para a determinação de Rp, o uso do extensómetro é obrigatório



e – extensão percentual – deformação,
expressa em percentagem do comprimento do extensómetro,

e_p – percentagem especificada de extensão plástica,

R – stress,

R_p – resistência à prova, extensão plástica

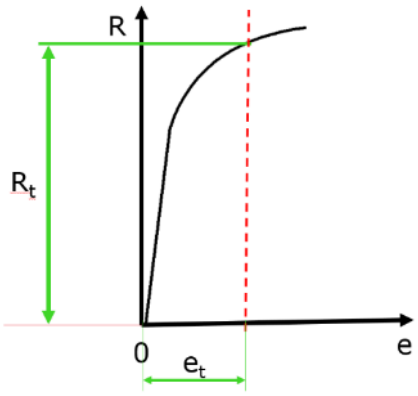
Figura 15: Resistência à prova, extensão plástica, Rp [1].

- **Força de prova, extensão total, R_t**

  Tensão na qual a extensão total (extensão elástica mais extensão plástica) é igual a uma percentagem especificada do comprimento do extensómetro L_e.

  É acrescentado um sufixo ao subscrito para indicar a percentagem prescrita, por exemplo, $R_{t0,5}$

  Para a determinação de R_t, é obrigatório o uso de extensómetro



e – extensão percentual,

e_t – percentagem de extensão total,

R – stress,

R_p – resistência à prova, extensão total

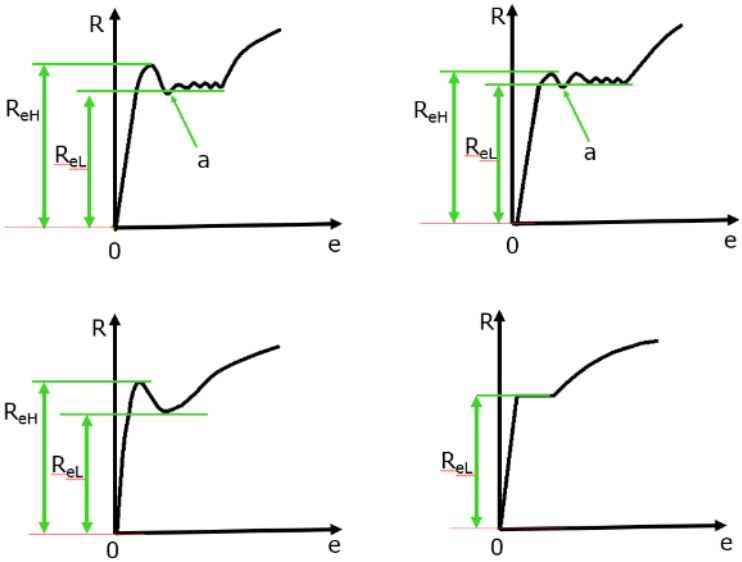
Figura 16: Resistência à prova, extensão total, Rt [1].

- **Resistência ao rendimento, R_e**

  Ocorre quando o material metálico apresenta um fenómeno de rendimento, tensão correspondente ao ponto atingido durante o ensaio em que ocorre a deformação plástica sem qualquer aumento da força.

- **Resistência superior ao escoamento, R_{eH}**
  Valor máximo de tensão antes da primeira diminuição de força

- **Menor resistência ao rendimento, R_{eL}**
  Menor valor de tensão durante a produção de plástico, ignorando quaisquer efeitos transitórios iniciais.



e – extensão percentual,

R – stress,

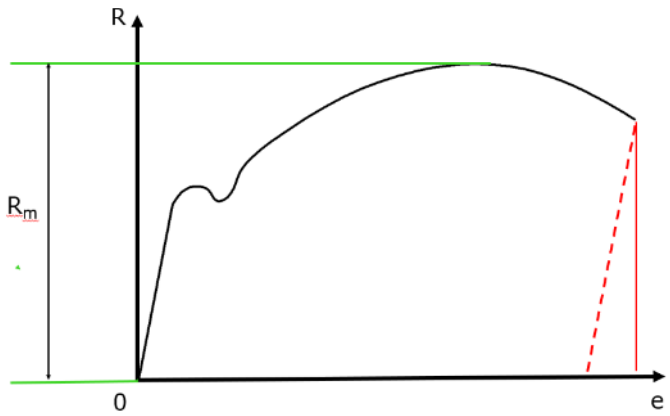
R_{eH} – resistência superior ao rendimento,

R_{eL} – menor resistência ao rendimento,

a – efeito transitório inicial.

Figura 17: Exemplos de resistências de rendimento superiores e inferiores para diferentes tipos de curvas [1].

- **Resistência à tração, R_m**
  Tensão correspondente à força máxima



e – extensão percentual,

R – stress,

R_m – resistência à tração,

Figura 18: Exemplo de resistência à tração [1].

2.1.1.2.2. Provetes

a) Forma e dimensões

A forma e as dimensões das peças podem ser limitadas pela forma e dimensões do produto metálico do qual os provetes foram colhidos. A amostra para teste é, na maioria das vezes, preparada por maquinagem a partir de um produto ou produto semiacabado. Também é possível testar componentes sem serem maquinados (por exemplo, tubos, fios, barras, etc.).

As secções transversais da amostra podem ser circulares, quadradas, retangulares, anulares ou, em casos especiais, outras formas.

Os provetes preferidos (provetes proporcionais) devem ter uma relação definida entre o comprimento do dispositivo original, L_0 e a área de secção transversal original, S_0 de acordo com a fórmula:

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \qquad (3)$$

em que k – coeficiente de proporcionalidade.

O valor mais comum é **k=5,65**. Nos casos em que o comprimento do dispositivo seja inferior a 15 mm, pode ser obtido um valor mais elevado de **k=11,3** ou pode ser feita uma amostra não proporcional.

No caso de amostras não proporcionais, o comprimento original do calibre L_0 não depende da área de secção transversal original S_o.

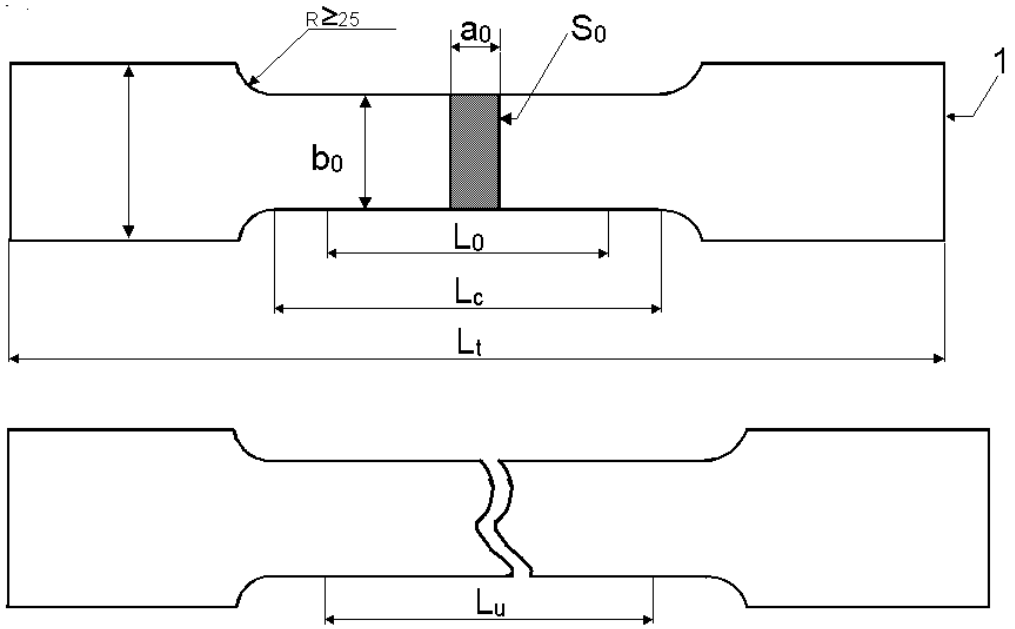


Figura 19: Provete maquinado de secção transversal retangular [1].

a_0 – espessura original de uma peça de ensaio plana ou espessura de parede de um tubo
b_0 – largura original do comprimento paralelo de um provete plano
L_c – comprimento paralelo
L_0 – comprimento original do dispositivo
L_t – comprimento total do provete
L_u – comprimento do calibre final após fratura
S_0 – área de secção transversal original de comprimento paralelo
1 – extremidades fixas

A ISO 6892-1 também fornece dimensões de amostra que podem ser usadas para vários componentes. O quadro 1 resume os principais tipos de provetes por tipo de produto.

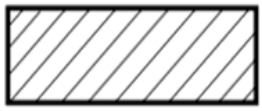
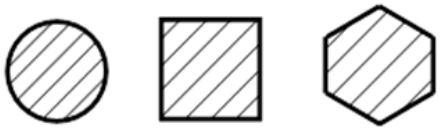
Tipo de produto		Tabela
Folhas – Placas - Chapas	Arame – Barras – Secções	
		
Espessura a, mm	Diâmetro ou lado mm	
0,1≤ a < 3	-	Tabela 2
-	< 4	Tabela 3
A ≥ 3	≥ 4	Tabela 4
Tubos		Tabela 5

Tabela 1: Principais tipos de provetes de acordo com o tipo de produto.

Tipo de peça de ensaio	Largura b_0	Comprimento original do dispositivo L_0	Comprimento paralelo L_c		Comprimento livre entre os punhos para o lado paralelo do provete
			Mínimo	Recomendado	
1	12,5 ± 1	50	57	75	87.5
2	20 ± 1	80	90	120	140
3	25 ± 1	50[1]	60[1]	-	Não definido
Tolerâncias relativas à largura do provete					
Largura nominal do provete			Tolerância de maquinagem[2]		Tolerância na forma[3]
12.5			±0.05		0.06
20			±0.10		0.12
25			±0.10		0.12

[1]A relação L_0/b_0 de um provete de tipo 3 em comparação com um dos tipos 1 e 2 é muito baixa. Consequentemente, as propriedades, especialmente o alongamento após fratura, medidas com este provete, serão diferentes de outros tipos de provetes.
[2] Estas tolerâncias são aplicáveis na largura nominal do provete para o cálculo da secção transversal inicial S_0, sem que seja necessário medir a largura de cada provete.
[3] Desvio máximo entre as medidas da largura ao longo de todo o comprimento paralelo L_c, do provete

Tabela 2: Dimensões e tolerâncias dos provetes para produtos finos: folhas, riscas e chapas com espessura compreendida entre 0,1 mm e 3 mm.

1.	O comprimento do dispositivo original, L_0, deve ser entendido como: - 200 mm ± 2 mm - 100 mm ± 1 mm
2.	A distância entre os punhos da máquina deve ser igual a, pelo menos, $L_0 + 3b_0$, mas mínima de L_0 + 20 mm.
3.	Se não for necessário determinar a percentagem de alongamento após a fração, pode utilizar-se uma distância entre as pegas de, pelo menos, 50 mm.
4.	Determinar S_0 com uma precisão igual ou superior a ± 1 % para os produtos de secção circular, a área da secção transversal original pode ser calculada a partir da média aritmética de duas medições efetuadas em duas direções perpendiculares.
5.	A área transversal original, S_0, em milímetros quadrados, pode ser determinada a partir da massa de um comprimento conhecido e da sua densidade: $$S_0 = \frac{1000 \cdot m}{\rho \cdot L_t} \quad (4)$$ m, massa, em gramas, do provete, ρ, é a densidade, em gramas por centímetro cúbico, do material do provete, L_t é o comprimento total, em milímetros, dos provetes.

Tabela 3: Dimensões e tolerâncias dos provetes para fios, barras e perfis de diâmetro ou espessura inferiores a 4 mm.

1.	O raio mínimo de transição entre as extremidades fixas e o comprimento paralelo deve ser: - $0{,}75d_0$, em que d_0 é o diâmetro do comprimento paralelo, para o provete cilíndrico, - 0,12 mm para os outros provetes.
2.	A secção transversal do provete pode ser: circular, quadrada, retangular, ou de outra forma
3.	Para provetes com secção transversal retangular, a relação largura/espessura não deve exceder 8:1
4.	O diâmetro do comprimento paralelo do provete cilíndrico maquinado não deve ser inferior a 3 mm.
5.	O comprimento paralelo, L_c, deve ser pelo menos igual: $L_0 + \left(\frac{d_0}{2}\right)\ for\ cylindrical\ tes\ piece$ $L_0 + 1.5\sqrt{S_0}\ for\ proportional\ test\ pieces\ other\ than\ cylindrical\ tes\ pieces$ $L_0 + \left(\frac{b_0}{2}\right)\ for\ non-proportional\ tes\ pieces$ Em caso de contestação, deve utilizar-se o comprimento L_0+2d_0 ou $L_0+2\sqrt{S_o}$, consoante o tipo de provete, a menos que o material seja insuficiente
6.	O comprimento livre entre os punhos da máquina deve ser suficiente para que as marcas estejam pelo menos a uma distância de $\sqrt{S_o}$ dos punhos.
7.	Regra geral, utilizam-se provetes proporcionais quando L_0 estiver relacionado com a secção transversal original S_0, em que k for igual a 5,65 $L_0 = k\sqrt{S_0}$. Alternativamente, 11,3 pode ser usado como o valor k.

Provetes circulares de secção transversal			
Coeficiente de proporcionalidade, k	Diâmetro, d, mm	Comprimento original do dispositivo, $L_0 = k\sqrt{S_0}$, mm	Comprimento paralelo mínimo, L_c, mm
5.65	20	100	110
	14	70	77
	10	50	55
	5	25	28
Provetes não proporcionais			
Podem ser utilizados provetes não proporcionais, se especificados na norma do produto. O comprimento paralelo, L_c, não deve ser inferior a $L_0 + b_0/2$. Em caso de contestação, deve utilizar-se o comprimento paralelo $L_c = L_0 + 2b_0$, a menos que o material seja insuficiente			
Dimensões planas típicas da peça de ensaio			
Largura b_0, mm	Comprimento original do dispositivo, L_0, mm	Comprimento paralelo mínimo L_c, mm	Comprimento total aproximado L_t, mm
40 ± 0,7	200	220	450
25 ± 0,7	200	212,5	450
20 ± 0,5	80	90	300

Tabela 4: Dimensões e tolerâncias dos provetes para folhas e chapas de espessura plana igual ou superior a 3 mm e para fios, barras e perfis de diâmetro ou espessura igual ou superior a 4 mm.

1. O comprimento do tubo pode ser ligado em ambas as extremidades. O comprimento livre entre cada tampão e as marcas do dispositivo mais próximo deve ser superior a $D_0/4$. Em caso de litígio deve ser utilizado o valor D_0, se houver material suficiente.
2. O comprimento da tampa projetada para além das pegas da máquina na direção das marcas do dispositivo não deve exceder D_0 e a sua forma deve ser tal que não interfira com a deformação do comprimento do dispositivo.
3. O comprimento paralelo L_c das tiras longitudinais não deve ser achatado pelas cabeças que podem ser achatadas para serem agarradas na máquina de ensaio
4. S_0 para o provete deve ser determinado com uma aproximação igual ou superior a ±1 %.
5. A área transversal original, S_0, em milímetros quadrados, do comprimento do tubo ou da tira longitudinal ou transversal pode ser determinado a partir da massa do provete cujo comprimento foi medido e da sua densidade:

$$S_0 = \frac{1000 \cdot m}{\rho \cdot L_t} \qquad (4)$$

m, massa, em gramas, do provete,

ρ, é a densidade, em gramas por centímetro cúbico, do material do provete,

L_t é o comprimento total, em milímetros, dos provetes.

6. A área transversal original S_0, de um provete constituído por uma amostra longitudinal calcula-se de acordo com: (5) $$S_0 = \frac{b_0}{4}(D_0^2 - b_0^2)^{\frac{1}{2}} + \frac{D_0^2}{4}\arcsin\left(\frac{b_0}{D_0}\right) - \frac{b_0}{4}[(D_0 - 2a_0)^2 - b_0^2]^2$$ $$-\left(\frac{D_0 - 2a_0}{2}\right)^2 arcsin\left(\frac{b_0}{D_0 - 2a_0}\right)$$
7. A fórmula simplificada pode ser utilizada para provetes longitudinais em que a relação entre a largura e o diâmetro externo do tubo é inferior aos limites estabelecidos: (6) $$S_0 = a_0 b_0 \left[1 + \frac{b_0^2}{6D_0(D_0 - 2a_0)}\right] \quad if \ \frac{b_0}{D_0} < 0.25 \quad (7)$$ $$S_0 = a_0 b_0 \quad if \ \frac{b_0}{D_0} < 0.10$$
8. Para o comprimento do tubo, a área de secção transversal original S_0 deve ser calculado a partir de (8) $$S_0 = \pi a_0 (D_0 - a_0)$$

Tabela 5: Dimensões e tolerâncias dos provetes para tubos.

2.1.1.2.3. Condições de ensaio

a) Regulação do ponto de força zero

O sistema de medição da força deve ser regulado para zero após a montagem do conjunto de carga, mas antes de o provete ser efetivamente fixo em ambas as extremidades. Uma vez fixado o ponto de força zero, o sistema de medição da força não deve ser alterado de forma alguma durante o ensaio.

b) Método de preensão

Os provetes devem ser agarrados por meios adequados, tais como cunhas, pegas aparafusadas ou faces paralelas da mandíbula ou suporte com ombros.

Devem ser envidados todos os esforços para assegurar que os provetes sejam manuseados de modo a que a força seja aplicada o mais axialmente possível, a fim de minimizar a flexão. Isto é particularmente importante ao testar materiais frágeis ou ao determinar a resistência à prova (extensão plástica), a resistência à prova (extensão total) ou a resistência ao rendimento.

A fim de assegurar o alinhamento com o provete e o dispositivo de preensão, pode aplicar-se uma força preliminar, desde que não exceda um valor correspondente a 5 % da resistência ao rendimento especificada ou prevista. Deve proceder-se a uma correção da prorrogação para ter em conta o efeito da força preliminar.

c) Taxas de teste

Salvo indicação em contrário, a escolha do método (A1, A2 ou B) e as taxas de ensaio são efetuadas pela diretriz do procedimento ou pelo laboratório de ensaio designado pelo produtor.

Método A – Taxa de ensaio baseada na taxa de deformação

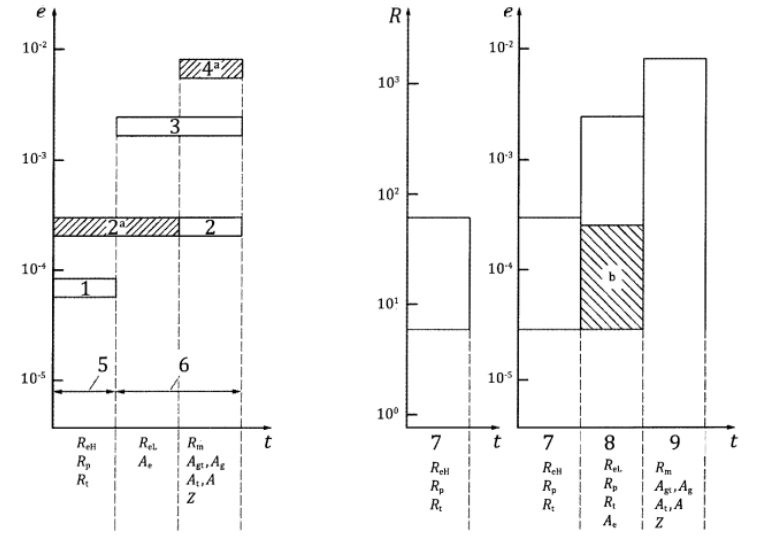
Este método destina-se a minimizar a variação das taxas de ensaio durante o momento em que os parâmetros sensíveis à taxa de deformação são determinados e a minimizar a incerteza de medição dos resultados do ensaio.

Existem dois tipos diferentes de controlo da taxa de deformação:

A1 – circuito fechado envolve o controlo da própria taxa de deformação, $\dot{e}_{L_e}$, que é baseada no feed-back obtido de um extensómetro.

A2 – O circuito aberto envolve o controlo da taxa de deformação estimada ao longo do comprimento paralelo $\dot{e}_c$, que é conseguido utilizando a taxa de separação da cabeça cruzada calculada multiplicando a taxa de deformação necessária pelo comprimento paralelo.

A taxa de deformação deve ser mantida durante a determinação da propriedade material relevante.



Key

$\dot{e}$ strain rate, in s^{-1}

$\dot{R}$ stress rate, in MPa s^{-1}

t time

1 range 1: $\dot{e}$ = 0,000 07 s^{-1}, with a relative tolerance of ±20 %

2 range 2: $\dot{e}$ = 0,000 25 s^{-1}, with a relative tolerance of ±20 %

3 range 3: $\dot{e}$ = 0,002 s^{-1}, with a relative tolerance of ±20 %

4 range 4: $\dot{e}$ = 0,006 7 s^{-1}, with a relative tolerance of ±20 % (0,4 min^{-1}, with a relative tolerance of ±20 %)

5 control mode: extensometer control (Method A1 closed loop) or crosshead control (Method A2 open loop)

6 control mode: crosshead control (Method A2 open loop)

7 elastic range of the test

8 plastic range for the determination of R_{eL}, R_p, R_t, A_e

9 maximum strain rate for the determination of R_m, A_{gt}, A_g, A_t, A, Z

[a] Recommended.

[b] Expanded range to lower rates, if testing machine is not capable of measuring or controlling the strain rate (see 10.3.3.2.5).

NOTE 1 Symbols refer to Table 1.

NOTE 2 Strain rate in the elastic range for method B is calculated from stress rate using a Young's modulus of 210 000 MPa (steel).

Figura 20: Ilustração das taxas de deformação a utilizar durante o ensaio de tração (Método A).

Método B – Taxa de ensaio baseada na taxa de tensão

As taxas de ensaio devem estar em conformidade com os seguintes requisitos, dependendo da natureza do material. Salvo indicação em contrário, pode utilizar-se qualquer velocidade de ensaio conveniente até uma tensão equivalente a metade da resistência especificada.

- Resistência superior ao escoamento, R_{eH}
  A taxa de separação das cabeças transversais da máquina deve ser mantida tão constante quanto possível e dentro dos limites correspondentes às taxas de tensão:

Módulo de elasticidade do material E MPa	Taxa de stress $\dot{R}$ $MPa\ s^{-1}$	
	mín.	máx.
<150 000	2	20
≥150 000	6	60

Tabela 6: Taxa de stress.

- Menor resistência ao rendimento, R_{eL}
  Se apenas for determinada a menor resistência ao escoamento, a taxa de deformação durante o rendimento do comprimento paralelo do provete deve situar-se entre:
  $0{,}025^{s-1}$ e $0{,}0025^{s-1}$
  A taxa de deformação dentro do comprimento paralelo deve ser mantida tão constante quanto possível. Se esta taxa não puder ser regulada diretamente, deve ser fixada regulando a taxa de tensão imediatamente antes do início do rendimento, não sendo o controlo da máquina ajustado até à conclusão do rendimento.

  No caso de a taxa de stress na gama elástica exceder as taxas máximas na Tabela 6.

d) Determinação da resistência superior e inferior ao escoamento, R_{eH}, R_{eL}

R_{eH}, R_{eL} podem ser determinados a partir da curva força-extensão ou do indicador de carga do pico de acordo com a Figura 17. O valor calcula-se dividindo a força pela secção transversal original do provete, S_0.

e) Determinação da resistência à prova, extensão plástica, R_p

R_p é determinado a partir da curva força-extensão traçando uma linha paralela à porção linear da curva e a uma distância desta equivalente à extensão percentual de plástico prescrita, por exemplo, 0,2 %. O ponto em que esta linha se cruza com a curva dá a força correspondente à extensão plástica de força de prova desejada (Figura 15). Esta última obtém-se dividindo esta força pela secção transversal original do provete, S_0.

f) Determinação da resistência à prova, extensão total, R_t

R_t é determinada a partir da curva força-extensão traçando uma linha paralela ao eixo ordenado (eixo de força) e a uma distância deste equivalente à extensão percentual total prescrita. O ponto em que esta linha se cruza com a curva dá a força correspondente à força de prova desejada (Figura 16). O valor calcula-se dividindo esta força pela secção transversal original do provete, S_0.

2.1.1.2.4. Descrição do ensaio (passo a passo)

a) Preparação das amostras em conformidade com o ponto 3.2 do procedimento

- As amostras devem ser inspecionadas visualmente e a presença de quaisquer imperfeições na superfície de medição deve ser anotada no relatório de ensaio.
- Medir as dimensões da amostra em conformidade com o ponto 3.2 do procedimento
- Determinar as bases de medição na amostra de acordo com as diretrizes do ponto 3.1 Princípio – Percentagem de alongamento após fratura – A do procedimento

b) Preparação da máquina de ensaio

- verificar a posição zero dos manómetros [ponto 3.3, alínea a)]
- Selecionar a resistência à tração [ponto 3.3, alínea c)]
- colocar a amostra na máquina

c) Realizar o ensaio de tração

- O ensaio deve ser efetuado em conformidade com as disposições da norma ISO 6892-1 e com as diretrizes constantes do presente documento.
- O método de ensaio em máquinas individuais depende do equipamento disponível. Devem ser fornecidas instruções de utilização para a máquina disponível.

d) Relatório de ensaio

O relatório de ensaio deve conter, pelo menos, as seguintes informações, salvo acordo em contrário entre as partes interessadas:

- Referência à norma ou ao presente documento, alargada com a informação sobre a condição de ensaio,
- Identificação do provete
- Material especificado, se souber
- Tipo de provete

- Localização e direção de amostragem do provete, se for conhecida
- Modo de controlo de ensaio e intervalo da taxa ou da taxa de ensaio, se diferentes dos métodos recomendados (A ou B)
- Resultados dos ensaios (os resultados devem ser arredondados para as seguintes precisões ou superiores, salvo especificação em contrário nas normas do produto: valores de resistência em MPa para o número inteiro mais próximo, valores percentuais de pontos de rendimento Ae, para 0,1 % mais próximos, todos os outros valores percentuais de extensão e alongamento para 0,5% mais próximos, redução percentual da área Z, para 1 % mais próximo.

2.1.1.3. Referências

[1] EN ISO 6892-1: “Metallic materials. Tensile testing. Method of test at room temperature”

[2] EN ISO 6892-2: “Metallic materials. Tensile testing. Method of test at elevated temperature”

[3] ASTM E8: “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”

2.2. Ensaios de tração de juntas soldadas com soldas de topo a topo, juntas cruciformes, juntas sobrepostas e juntas com soldas de ângulo

2.2.1. Introdução

As juntas soldadas são amplamente utilizadas em várias indústrias, como construção, produção e transporte. As propriedades mecânicas das juntas soldadas são cruciais para determinar a integridade estrutural e a segurança dos componentes em que são utilizadas. O ensaio de tração de juntas soldadas é um dos ensaios destrutivos mais importantes da indústria de soldadura. É usado principalmente para fins de qualificação da especificação de procedimento de soldagem de acordo com normas como séries da EN ISO 15614, bem como ASME BPVC Seção IX. No entanto, a qualificação de procedimentos de soldadura não é a única aplicação do teste de tração na indústria de soldadura. O ensaio de tração também pode ser usado para verificar as propriedades mecânicas dos consumíveis de soldadura ou para confirmar a qualidade da produção da junta soldada de acordo com, por exemplo, as especificações do produto.

O princípio do ensaio é o mesmo que o ensaio de tração de materiais metálicos, pelo que, salvo especificação em contrário para pontos específicos, aplicam-se as regras gerais das normas EN ISO 6892-1 [1] e EN ISO 6892-2 [2]. Estas regras são abordadas no Capítulo 2.1 do presente Manual.

Existem vários tipos de ensaios de tração de juntas soldadas. Estes dependem principalmente do tipo de articulação. Este capítulo abordará alguns dos tipos mais populares:

- Ensaio de tração transversal de juntas soldadas
- Ensaio de tração longitudinal em solda
- Ensaio de tração em juntas cruciformes e lapidadas

As principais diferenças entre estes testes são a localização da amostra, a geometria da amostra e os resultados dos ensaios comunicados.

2.2.2. Ensaio de tração de juntas soldadas

2.2.2.1. Ensaio de tração transversal de juntas soldadas (EN ISO 4136)

O provete deve ser retirado transversalmente da junta soldada de modo a que, após maquinagem, o eixo de soldadura permaneça no meio do comprimento paralelo do provete. No caso dos tubos de pequeno diâmetro, o ensaio pode ser carbonizado em tubo inteiro, se não especificado pelas normas de aplicação ou acordado entre as partes contratantes, entende-se por "diâmetros pequenos" $D \leq 50$ mm. Os processos utilizados para extrair os provetes não devem alterar de modo algum as suas propriedades. O comprimento paralelo final do provete deve ser maquinado (serragem, fresagem, corte por jato de água) ou triturado. As superfícies devem estar isentas de riscos ou entalhes transversais à direção da amostra de ensaio no comprimento paralelo, L_c, exceto no caso de subcorte, que não deve ser removido a menos que a norma de aplicação aplicável o exija. Salvo indicação em contrário, todo o excesso de solda deve ser removido, exceto o talão de penetração em tubos de secção completa. A espessura do provete deve ser constante ao longo de um comprimento paralelo, devendo a forma e as dimensões ser conformes com as indicadas na Tabela 7, no que se refere aos símbolos indicados na Figura 22. As dimensões das amostras de ensaio de tubo de secção completa são apresentadas na Figura 23.

Em geral, a espessura do provete deve ser igual à espessura do metal de origem perto da junta soldada, no entanto, nos casos em que é necessário um ensaio de espessura total > de 30 mm, podem ser colhidos vários provetes para cobrir a espessura total da junta (ver Figura 21).

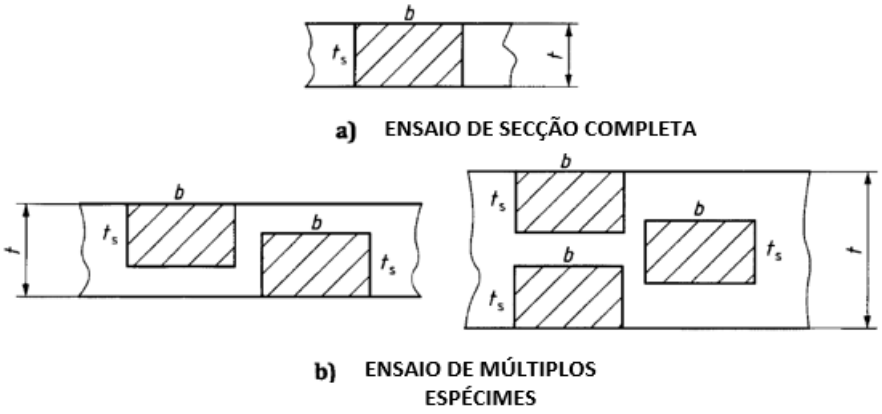


Figura 21: Exemplos de localização de provetes em articulações. Os provetes podem sobrepor-se.

Denominação		Símbolo	Dimensão em mm
Comprimento total do provete		L_t	para se adequar a uma máquina de ensaio específica
Largura do ombro		$b_{1º}$	b+12
Largura do comprimento paralelo	placas	b	12 para $t_s \leq 2$ 25 para $t_s > 2$
	tubos	b	6 para D ≤ 50 12 para D < 50 ≤ 168,3 25 para D > 168,3
Comprimento paralelo		L_c	$\geq L_s + 60$
Raio no ombro [a] [b]		r	≥ 25
[a] Para soldadura sob pressão e soldadura por feixe (grupos de processo 2, 4 e 5 de acordo com a norma ISO 4063, $L_s = 0$. [b] Para alguns outros materiais metálicos (por exemplo, alumínio, cobre e suas ligas podem ser necessários $L_c \geq L_s + 100$			

Tabela 7: Dimensões das placas e tubagens.

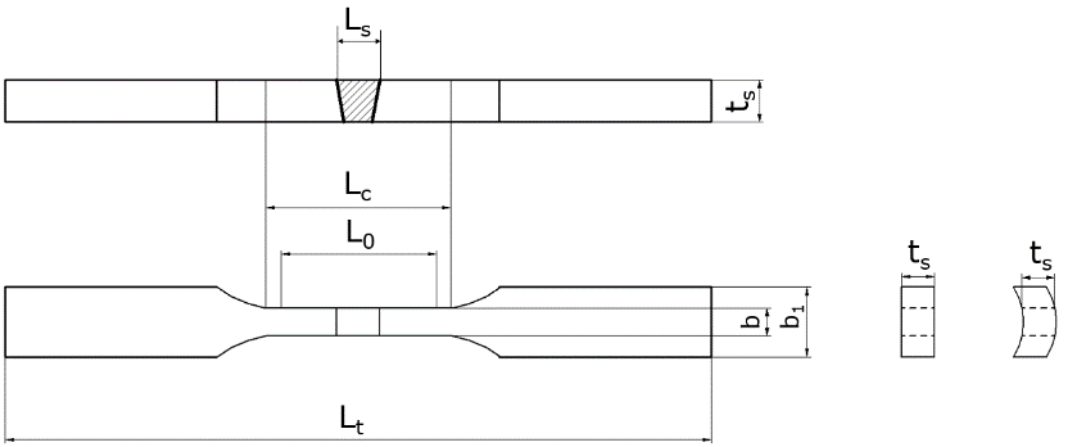


Figura 22: Amostra de ensaio para placas ou tubagens.

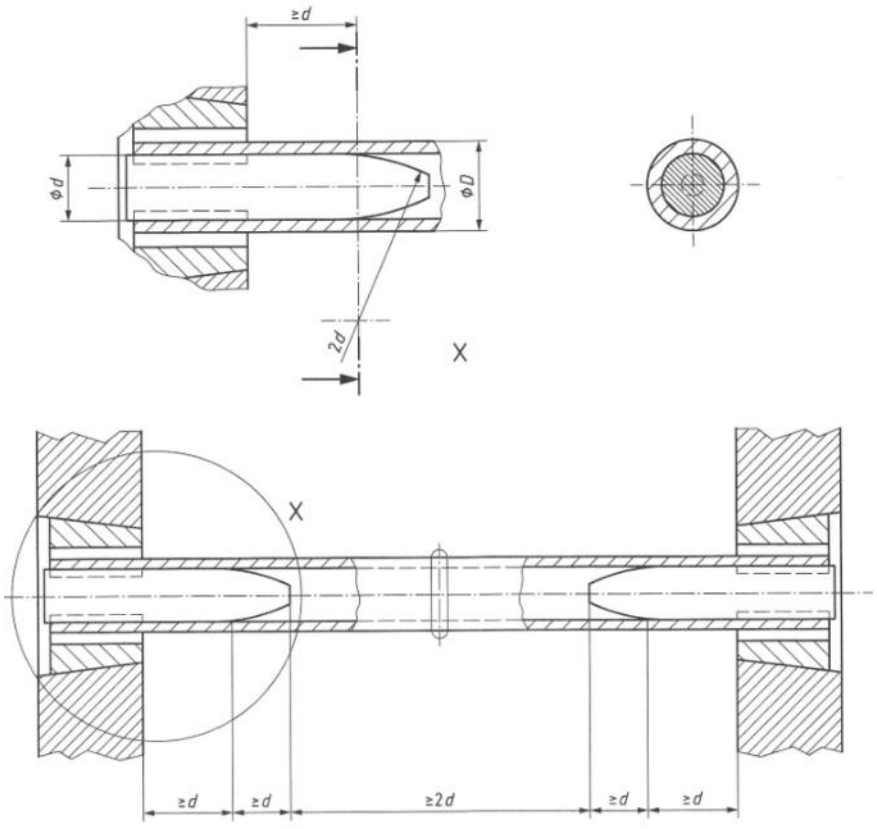


Figura 23: Amostra de ensaio para tubo de secção completa.

O provete deve ser carregado gradual e continuamente até à fratura em conformidade com a norma ISO 6892-1. Os resultados do ensaio consistem na resistência à tração da junta soldada R_m, determinada de acordo com a norma ISO 6892-1 e no local da fratura. A fratura pode ocorrer em um dos três materiais: metal de solda, zona afetada pelo calor (HAZ) ou metal original. Se necessário para facilitar

a localização da soldadura e da HAZ, o lado do provete pode ser marcado por marcogravura. O resultado desejado é a rutura do material original e a obtenção de uma resistência à tração pelo menos igual à resistência à tração do material original. Se ocorrer rutura do provete no metal de soldadura ou na HAZ e se atingir a resistência à tração correspondente, o resultado do ensaio é igualmente positivo. A Figura 24 mostra um diagrama da junta com possíveis causas de rutura da amostra na solda ou zona afetada pelo calor.

Após rutura do provete, examinam-se as superfícies fraturadas e regista-se a existência de quaisquer imperfeições que possam ter afetado negativamente o ensaio, incluindo o seu tipo, dimensão e quantidade.

O relatório de ensaio deve incluir as seguintes informações:

- referência à norma ISO 4136,
- tipo e localização do provete,
- temperatura de ensaio,
- resultados de ensaios,
- localização da fratura,
- tipo e dimensões das imperfeições observadas.

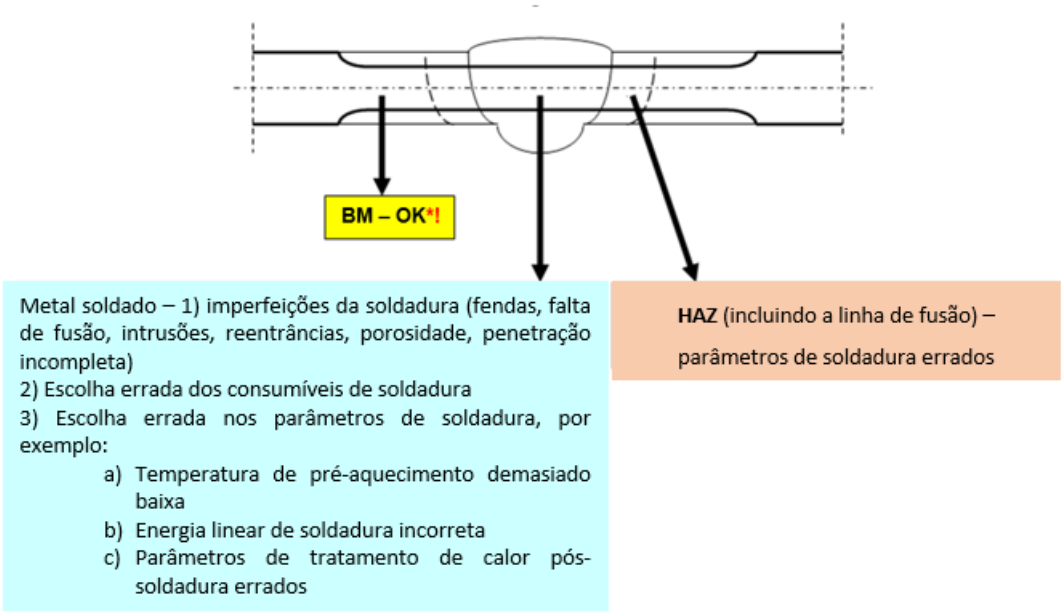


Figura 24: Diagrama da junta no provete de ensaio. Possíveis causas de fratura no metal de solda ou HAZ.

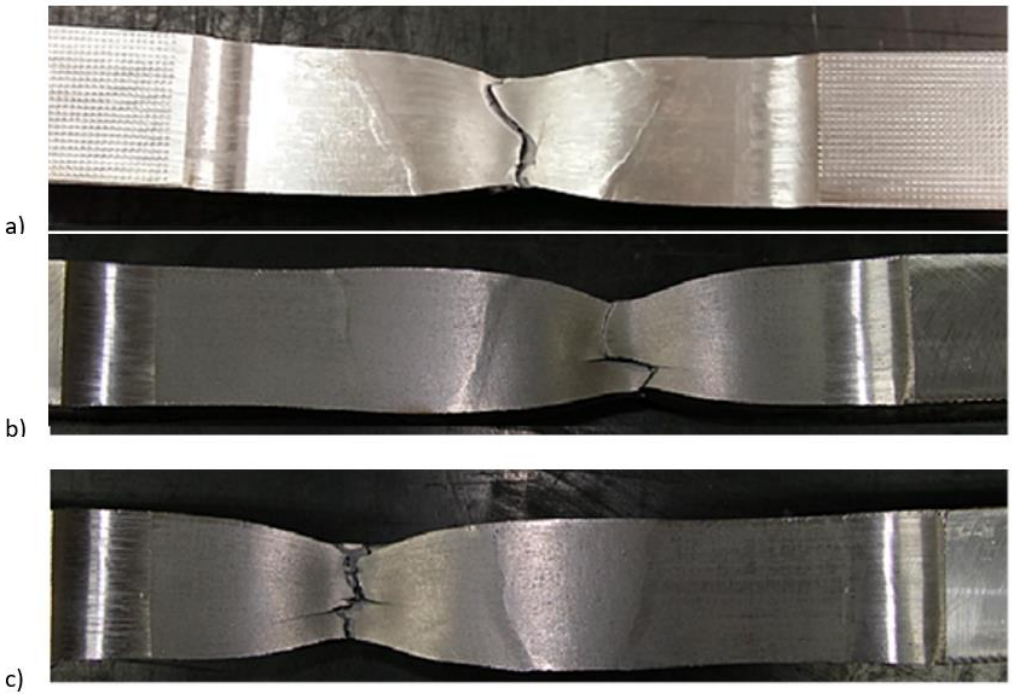


Figura 25: Exemplos de espécimes após a quebra.

2.2.2.2. Ensaio de tração longitudinal em metal de solda (EN ISO 5178)

O provete deve ser retirado longitudinalmente da junta soldada do produto fabricado ou do provete. Após a maquinagem, o comprimento paralelo da amostra de ensaio deve consistir apenas no metal de soldadura. Para permitir o posicionamento correto do provete na junta, a secção transversal da junta em ambas as extremidades do provete podem ser marcada por macrogravura. Salvo disposição em contrário na norma de aplicação específica relativa à junta soldada examinada, os provetes devem ser retirados do centro e do metal de soldadura, como indicado na Figura 26. Se o provete não for retirado de espessura média, deve registar-se a distância entre as superfícies, t_1. No caso de juntas soldadas muito espessas ou de dupla face, podem ser colhidos vários provetes em locais diferentes ao longo da espessura, caso em que devem registar-se as distâncias t_1 e t_2 de cada provete na secção transversal da articulação.

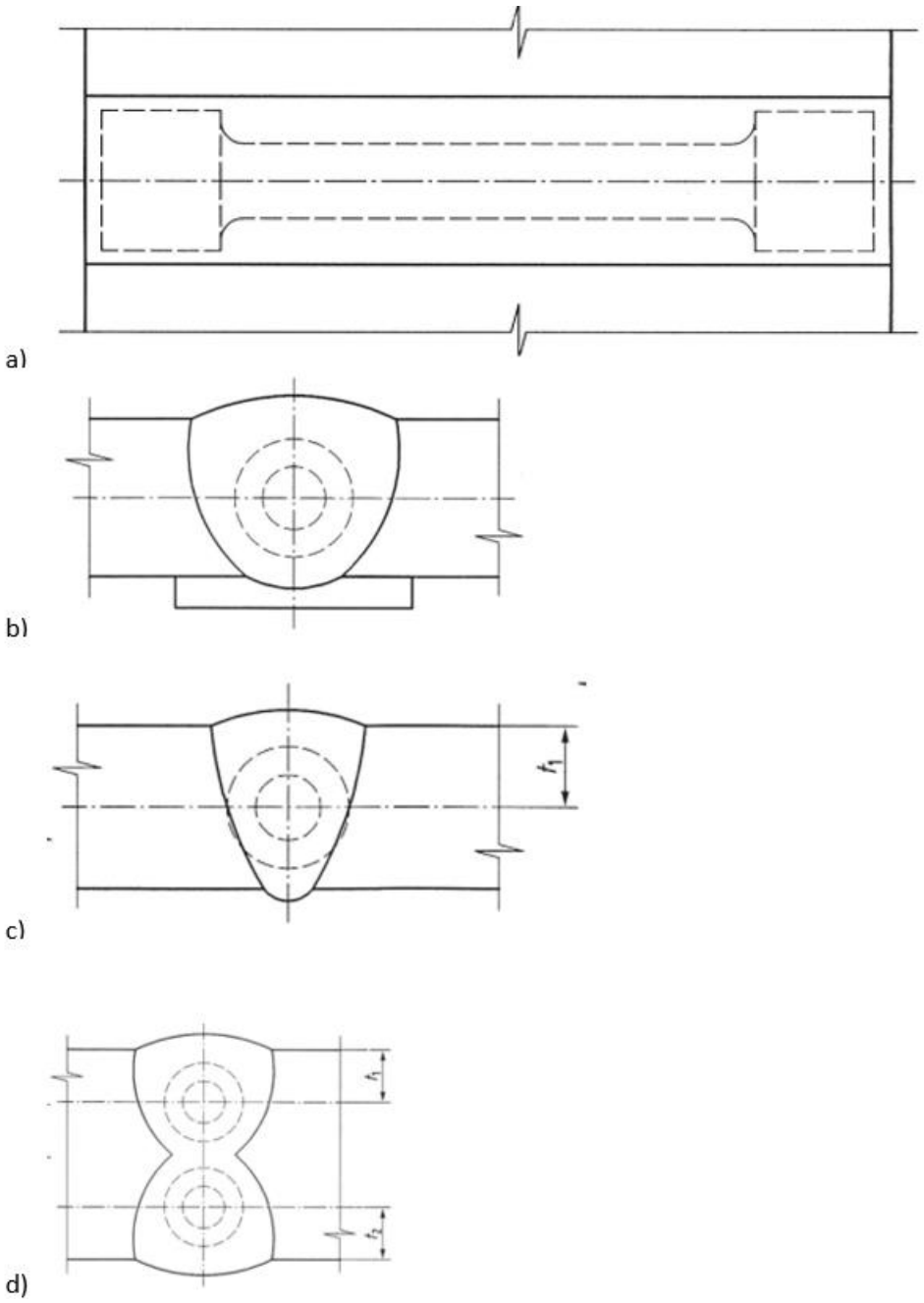


Figura 26: Exemplos de localização de espécimes: a) secção do plano longitudinal, b) provete de metal totalmente soldado para classificação dos consumíveis de soldadura, c) amostra de ensaio de uma junta soldada de um lado, d) amostra de ensaio que forma uma junta soldada de ambos os lados.

Cada provete deve ter uma secção circular e as suas dimensões, expressas em função do diâmetro d_0 do comprimento paralelo, devem estar em conformidade com a norma ISO 6892-1. Se possível, o diâmetro d_0 deve ter uma dimensão de 10 mm. Se tal não for possível, o diâmetro deve ser tão grande quanto possível, mas não inferior a 4 mm. As extremidades fixas das amostras de ensaio não estão descritas nas normas ISO 5178, pelo que devem ser compatíveis com a máquina de ensaio de tração usada.

O provete deve ser carregado gradual e continuamente até à determinação da fratura e do resultado do ensaio em conformidade com a norma ISO 6892-1. Como a amostra consiste apenas em metal de solda (ao contrário do ensaio de tração transversal onde consiste em metal de solda, HAZ e metal de origem), o resultado do teste deve consistir em extensão plástica de resistência de prova R_p (ou resistência de escoamento R e, extensão total de força de prova R_t), resistência à tração R_m, alongamento após fratura A e redução da área Z. Após rutura do provete, examinam-se as superfícies fraturadas e regista-se a existência de quaisquer imperfeições que possam ter afetado negativamente o ensaio, incluindo o seu tipo, dimensão e quantidade.

O relatório de ensaio deve incluir as seguintes informações:

- referência à norma ISO 4136,
- tipo e localização do provete,
- temperatura de ensaio,
- resultados de ensaios,
- localização da fratura,
- tipo e dimensões das imperfeições observadas
- diâmetro d_0.

2.2.2.3. Ensaio de tração em juntas cruciformes e lapidadas (EN ISO 9018)

Esta norma descreve um ensaio de tração para dois tipos de juntas: uma junta cruciforme e uma junta lapidada. Ambos os tipos de juntas consistem em várias soldas de ângulo que têm de ser medidas antes dos ensaios. Localização e geometria com dimensões dos espécimes são apresentadas nas Figuras 27 a 31.

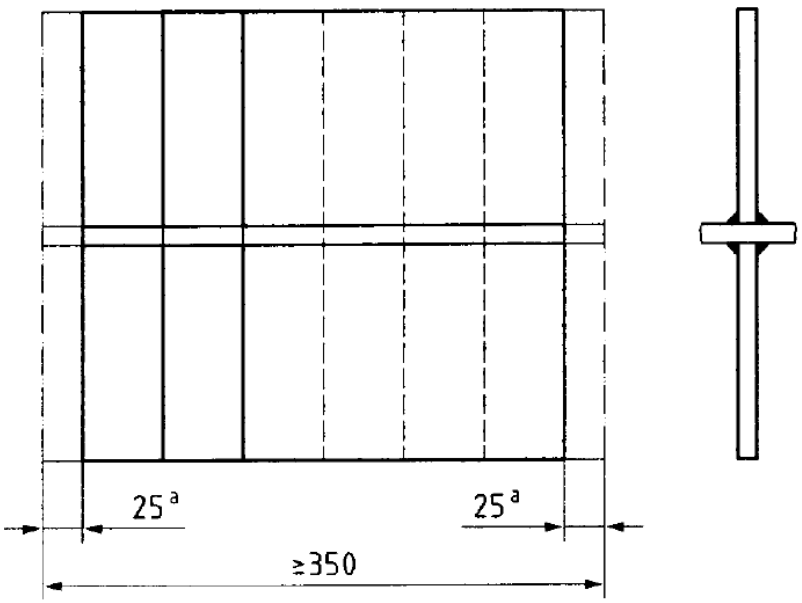


Figura 27: Localização do espécime de uma junta cruciforme. a As peças finais devem ser descartadas.

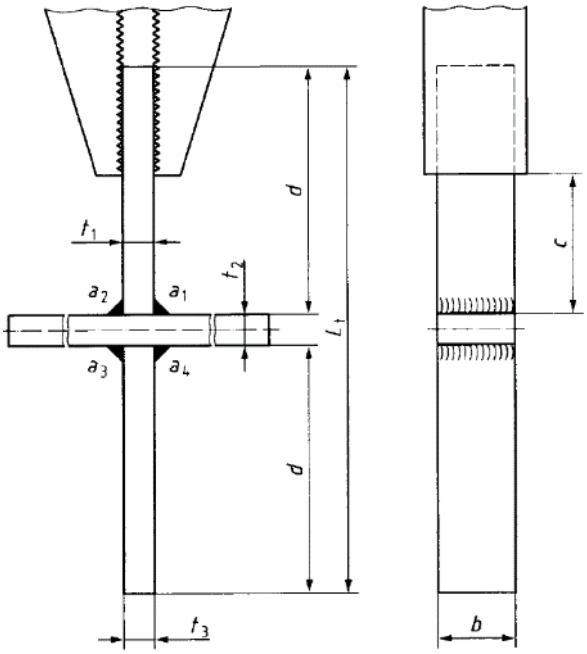


Figura 28: Provete da junta cruciforme.

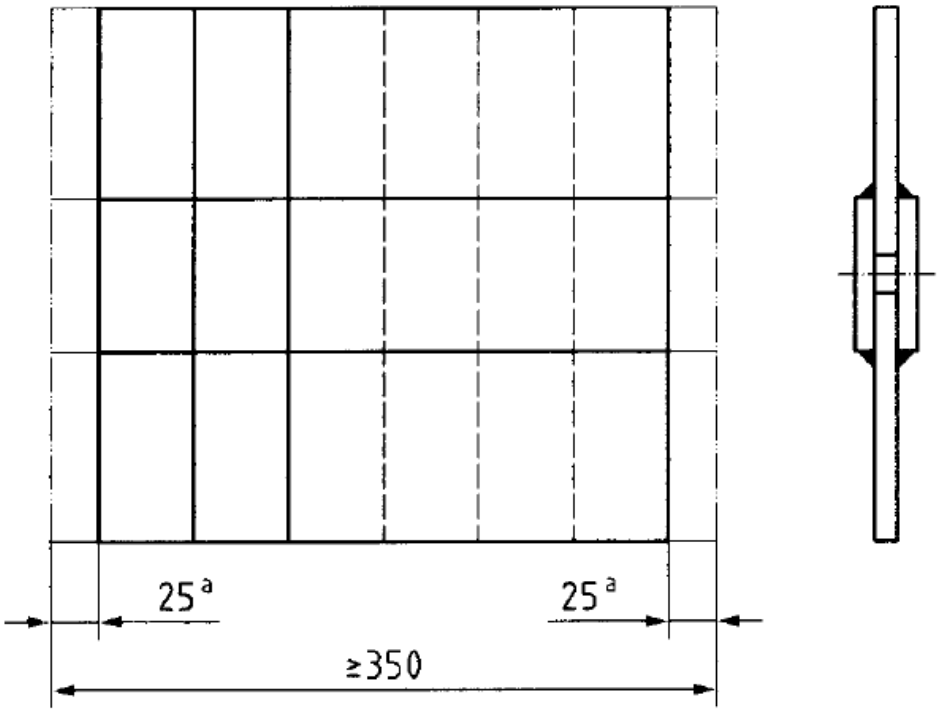


Figura 29: Localização do espécime de uma junta lapidada. a As peças finais devem ser descartadas.

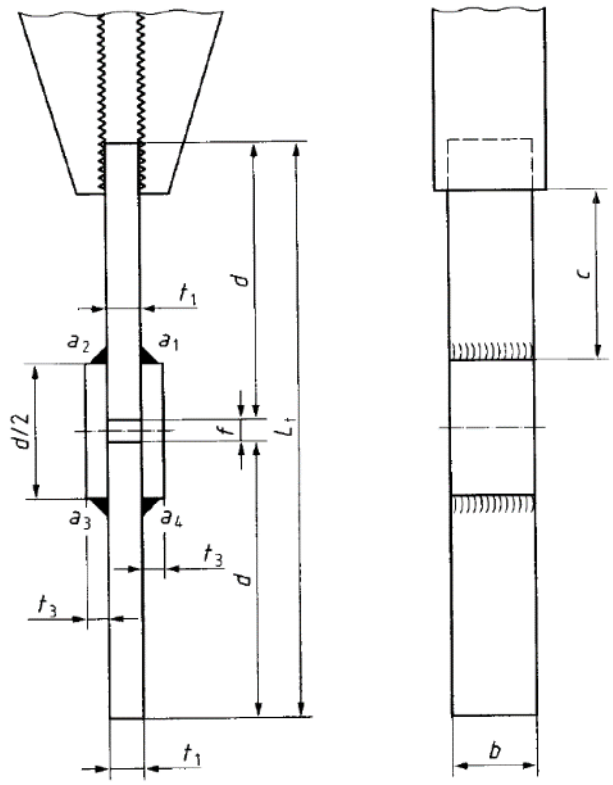


Figura 30: Provetes de ensaio de juntas lapidadas.

Antes do ensaio, devem medir-se e registar as dimensões dos provetes. O provete deve ser carregado gradual e continuamente numa direção perpendicular ao eixo da soldadura até ocorrer a rutura. A velocidade de carregamento deve ser tão uniforme quanto possível, devendo os ensaios ser progressivos e sem alterações bruscas.

Após os ensaios, devem ser medidas e registadas:

- a temperatura de ensaio, T,
- as superfícies de fratura devem ser examinadas e a existência de qualquer imperfeição, incluindo o seu tipo, tamanho e quantidade,
- a largura média da superfície de fratura w_f deve ser determinada medindo em vários pontos ao longo da fratura com um espaçamento de aproximadamente 3×a e dividindo pelo número total de medições,
- a resistência à tração R_m, calculada como a razão entre a carga máxima F_m, sustentada pelo provete durante o ensaio, e a área de fratura A_f expressa em MPa.

A largura da superfície de fratura deve ser medida como indicado na Figura 31.

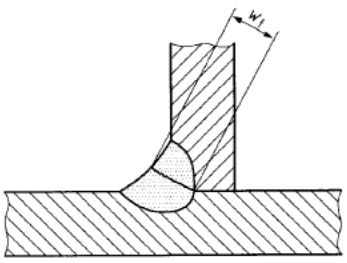


Figura 31: Definição da largura da superfície de fratura.

A superfície da fratura A_f devem ser calculados utilizando o Fórmula:

$$A_f = w_f * b \quad (1)$$

O relatório de ensaio deve incluir as seguintes informações:

- referência à norma ISO 9018,
- data dos ensaios,
- pormenores relativos ao examinador ou ao organismo de ensaio,
- dimensões do provete antes da fratura (A 1, A 2, A 3, A_4, T_1, T_2, T_3, B),
- quantidade de desalinhamento e distorção angular,
- localização da fratura,
- localização, tipo, tamanho e quantidade de eventuais imperfeições,
- largura média da fratura Superfície w_f,
- resistência à tração R_m,
- carga por unidade de comprimento F_m/b,
- temperatura de ensaio,
- Pormenores de qualquer tratamento térmico em conformidade com a norma de aplicação pertinente.

2.2.3. Referências

[1] EN ISO 6892-1: “Metallic materials. Tensile testing. Method of test at room temperature”.

[2] EN ISO 6892-2: “Metallic materials. Tensile testing. Method of test at elevated temperature”.

[3] EN ISO 4136: “Destructive tests on welds in metallic materials. Transverse tensile test”.

[4] EN ISO 5178: “Destructive tests on welds in metallic materials. Longitudinal tensile test on weld metal in fusion welded joints”.

[5] EN ISO 9018: “Destructive tests on welds in metallic materials. Tensile test on cruciform and lapped joints”.

2.3. Ensaios de dobragem de metais e juntas soldadas

2.3.1. Preâmbulo

O Ensaio de dobragem é um ensaio simples e muito importante para avaliar a ductilidade e a ausência de imperfeições numa junta soldada ou num revestimento feito por qualquer processo de soldadura por arco de fusão. Não é necessário registar a carga e a deflexão (ou deslocamento) durante o ensaio, sendo apenas realizada uma verificação visual após a execução do ensaio. O único dado mensurável é o alongamento; esse resultado é calculado a partir da diferença entre uma medida de referência antes (inicial) e depois do teste, depois essa diferença é dividida pela referência inicial para obter uma percentagem. Normalmente, o ensaio de curvatura é realizado em 4 amostras, colhidas com orientação específica com base na norma de aplicação ou por acordo entre as partes contratantes. Basicamente, o ensaio de dobragem é um teste crucial para qualificar um processo de soldagem por fusão numa base sem movimento.

Neste capítulo, o método de ensaio normalizado para realizar o ensaio de curvatura (ISO 5173) é apresentado e descrito.

2.3.2. Referências

- ISO 5173Destructive tests on welds in metallic materials — Bend tests —Amendment 1
- ASTM E340 Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys
- ISO 6892-1 Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature
- ISO 15614-1 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test — Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys

2.3.3. Introdução

O ensaio de curvatura tem como objetivo avaliar a ductilidade e/ou ausência de imperfeições na superfície da amostra ou perto dela. Submeter um provete, colhido transversal ou longitudinalmente de uma junta soldada, a uma deformação plástica dobrando-a, sem inverter a direção de dobragem, de modo a que uma das superfícies, ou secções transversais da junta soldada, esteja em tensão.

Salvo indicação em contrário, o ensaio deve ser efetuado à temperatura ambiente de (23 ± 5) °C.

Na tabela a seguir, a lista de termos adotados na ISO 5173 é relatada juntamente com suas descrições e definições (ver Tabela 8).

Os valores citados na Tabela 8 são apresentados abaixo.

Termo	Definição	Descrição
TFBB	Amostra de ensaio de dobragem transversal da face para uma soldadura de topo a topo	Amostra para a qual a superfície em tensão é o lado que contém a maior largura da solda ou do lado a partir do qual foi aplicado pela primeira vez o arco de soldadura, aplicável a corpos de prova transversais de soldadura. Ver Figura 32.
TRBB	Amostra de ensaio de dobragem transversal da raiz para uma soldadura de topo a topo	Provete cuja superfície em tensão seja o lado oposto ao do provete de soldadura da face, aplicável a amostras transversais de soldadura de topo a topo de gama. Ver Figura 33.

SBB	Amostra de ensaio de dobragem lateral transversal para uma soldadura de topo a topo	Amostra para a qual a superfície em tensão é uma secção transversal da soldadura. Ver Figura 34.
LFBB	Amostra de ensaio longitudinal da face para uma solda de topo a topo	Espécime cuja direção é paralela à direção da solda de topo a topo, aplicável a espécimes de curvatura da face e da raiz. Veja a Figura 35.
LRBB	Amostra de teste de dobragem de raiz para uma solda de topo a topo	Espécime cuja direção é paralela à direção da solda de topo a topo, aplicável a espécimes de curvatura da face e da raiz. Ver Figura 35.
hemograma completo	Amostra de ensaio de dobragem facial para revestimento sem soldadura de topo a topo	Espécime cujo revestimento está em tensão, aplicável tanto a amostras transversais como longitudinais. Ver Figura 36.
SBC	Amostra de ensaio de dobragem lateral para revestimento sem soldadura de topo a topo	Amostra para a qual a secção transversal da cobertura de revestimento está em tensão, aplicável tanto a espécimes transversais como a longitudinais. Ver Figura 37.
FBCB	Amostra de ensaio de dobragem facial para revestimento com soldadura de topo a topo	Amostra para a qual o revestimento está em tensão ou para o qual a secção transversal da cobertura de revestimento está em tensão e que contém uma solda de ponta. Ver Figuras 38.
SBCB	Amostra de ensaio de curvatura lateral para revestimento com soldadura de topo a topo	Amostra para a qual o revestimento está em tensão ou para o qual a secção transversal da cobertura de revestimento está em tensão e que contém uma solda de topo a topo. Ver Figura 39.
Um	Alongamento	Percentagem mínima de alongamento após fratura exigida pela especificação do material, medida em [%] de acordo com a norma ISO 6892-1
b	Largura (amostra)	Largura do provete, medida em [mm]
$b_{1º}$	Largura (fora da linha de fusão)	Largura da linha de fusão exterior, medida em [mm]
d	Diâmetro (anterior/rolo)	Diâmetro do rolo anterior ou interno, medido em [mm]
D	Diâmetro (tubo)	Diâmetro exterior do tubo, medido em [mm]
WT	Espessura da parede	Espessura da parede do tubo, medida em [mm]
l	Comprimento (intervalo)	Distância entre os rolos, medida em [mm]
L_f	Distância	Distância inicial entre o contacto do rolo e o eixo da soldadura, medida em [mm]
L_0	Comprimento do medidor	Comprimento original do dispositivo, medido em [mm]
L_s	Largura da solda	Largura máxima da solda após maquinagem, medida em [mm]
L_t	Comprimento da amostra	Comprimento total do provete, medido em [mm]
r	Raio	Raio dos bordos dos provetes, medido em [mm]
R	Raio	Raio dos rolos, medido em [mm]
t	Espessura (peça)	Espessura do provete, medida em [mm]
t_c	Espessura (folheado)	Espessura do revestimento, medida em [mm]
t_s	Espessura (amostra)	Espessura do provete, medida em [mm]

t_w	Espessura (material de base)	Espessura do material de base sob revestimento, medida em [mm]
α	Ângulo	Ângulo de dobragem, medido em [°]

Tabela 8 - Lista de termos e definições extraídos da ISO 5173.

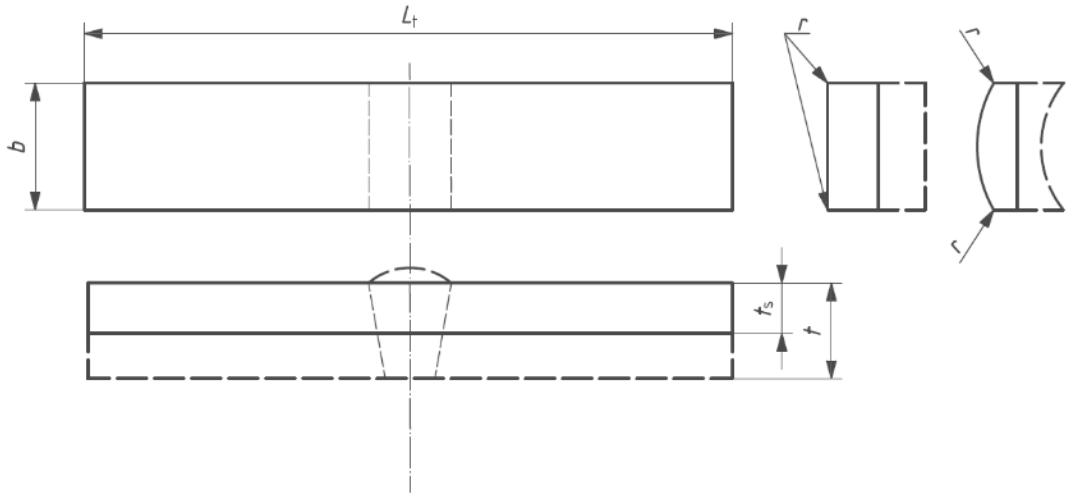


Figura 32 - Amostra de ensaio de dobragem transversal da face para uma solda de topo a topo (TFBB).

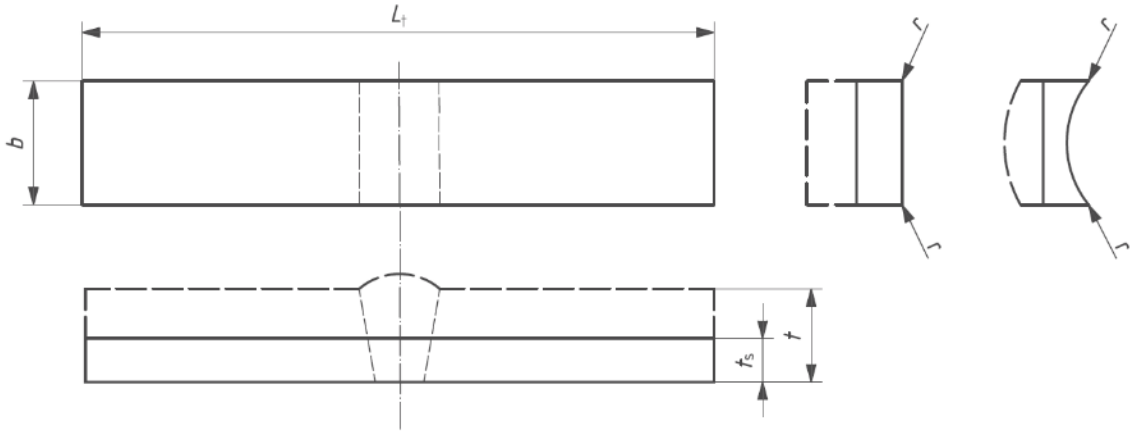


Figura 33 - Amostra de ensaio de dobragem transversal da raiz para uma solda de topo a topo (TRBB).

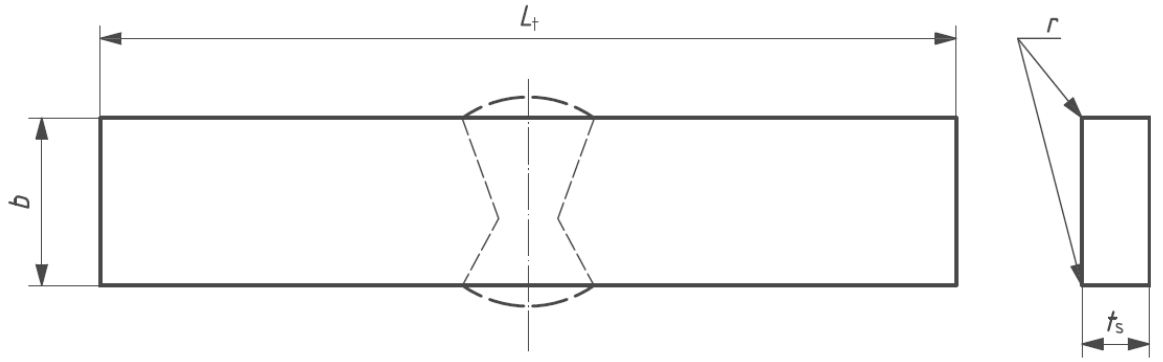


Figura 34 - Amostra de ensaio de dobragem lateral transversal para uma solda de topo a topo (SBB).

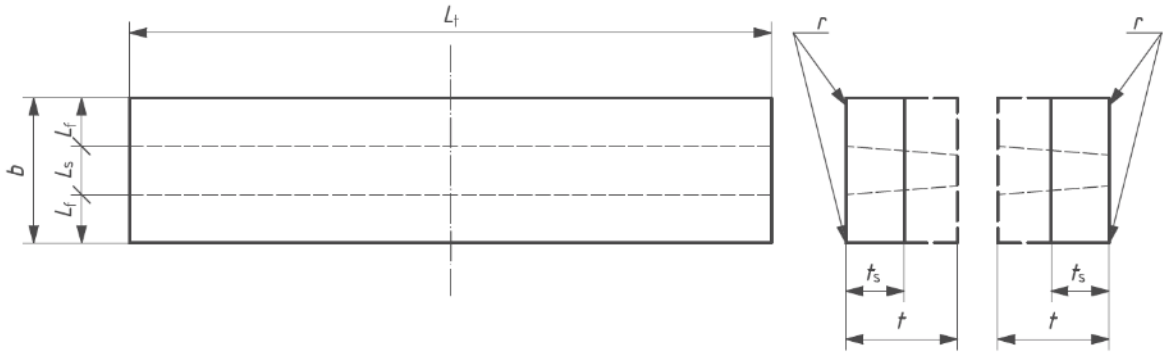


Figura 35 - Amostra de ensaio de dobragem longitudinal para uma solda de topo a topo (LFBB e LRBB).

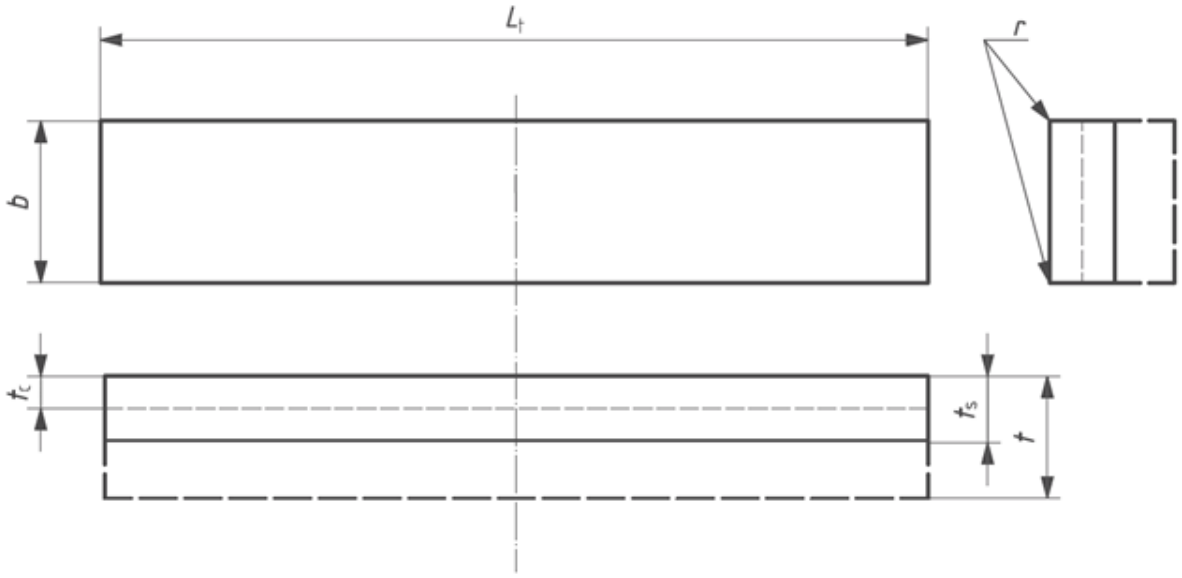


Figura 36 - Amostra de ensaio de dobragem facial para revestimento sem solda de topo a topo (FBC).

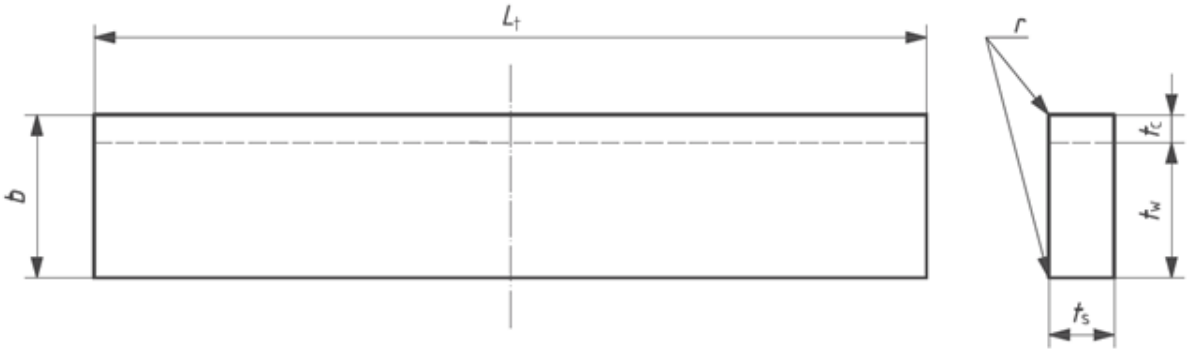


Figura 37 - Amostra de ensaio de dobragem lateral para revestimento sem soldadura de topo a topo (SBC).

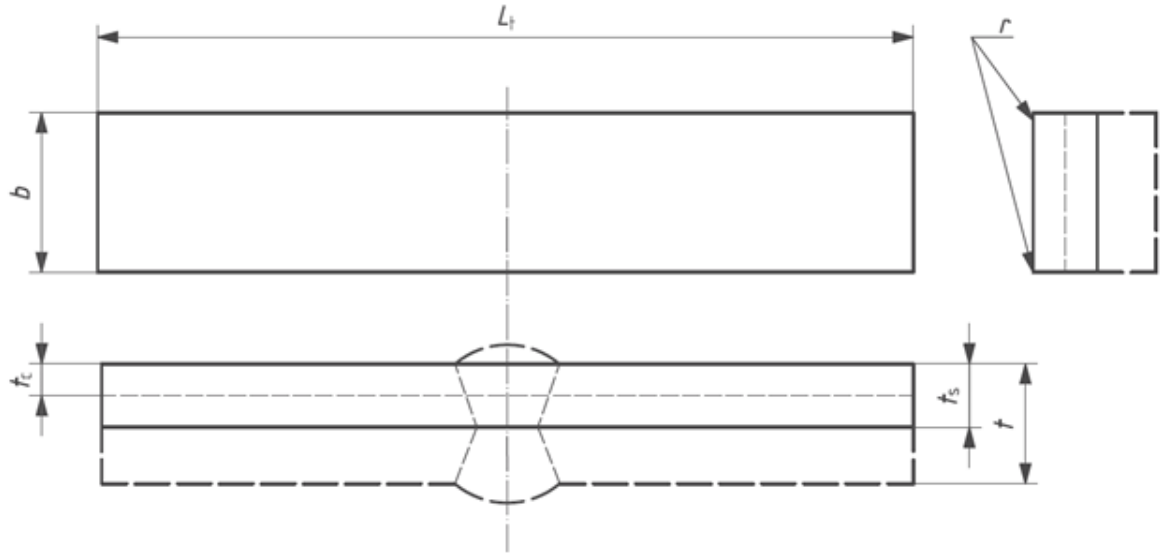


Figura 38 - Amostra de ensaio de dobragem facial para revestimento com solda de topo a topo (FBCB).

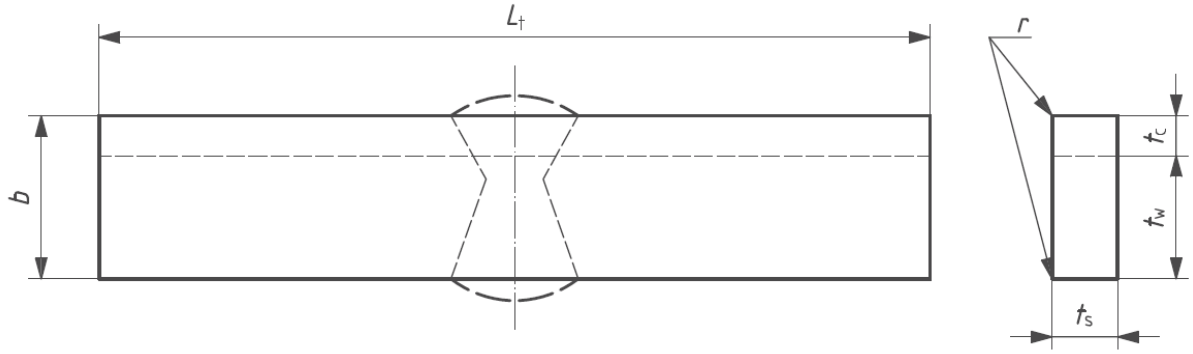


Figura 39 - Amostra de ensaio de dobragem lateral para revestimento com solda de topo a topo (SBCB).

2.3.4. Provetes de ensaio

Os provetes ou espécimes devem ser preparados de modo a não afetar nem o material de base nem o metal da soldadura.

Para o ensaio de dobragem transversal de soldaduras de topo a topo, o provete deve ser retirado transversalmente da junta soldada do produto fabricado ou do provete soldado, de modo a que, após a maquinagem, o eixo de soldadura permaneça no centro do provete ou numa posição adequada para o ensaio. Para o ensaio de dobragem longitudinal de soldaduras de topo a topo, o provete deve ser retirado longitudinalmente da junta soldada do produto fabricado ou do provete soldado. A localização e a orientação dos provetes de ensaio de curvatura de material de revestimento devem ser especificadas pela norma de aplicação ou por acordo entre as partes contratantes.

Cada provete deve ser marcado de modo a identificar a sua localização exata no produto fabricado ou na junta da qual foi retirado. Se a norma de aplicação aplicável o exigir, deve ser indicada a direção de trabalho (por exemplo, laminagem ou extrusão). Cada provete deve ser marcado de modo a identificar a sua localização exata no provete do qual foi retirado.

Não deve ser aplicado qualquer tratamento térmico à junta soldada ou à amostra de ensaio, a menos que tal seja especificado ou permitido pela norma de aplicação relativa à junta soldada a ensaiar. Os pormenores de qualquer tratamento térmico devem ser registados no relatório de ensaio. Se se verificar um envelhecimento natural das ligas de alumínio, deve registar-se o tempo decorrido entre a soldadura e o ensaio.

Os processos mecânicos ou térmicos utilizados para extrair o provete não devem alterar de modo algum as suas propriedades. É permitida a remoção mecânica de qualquer material afetado por corte térmico, desde que as dimensões finais dos espécimes estejam de acordo com as especificações indicadas na lista apresentada.

As superfícies do espécime de teste devem ser usinadas de forma a que, a menos que seja especificado de outra forma na norma de aplicação relevante e/ou por acordo entre as partes contratantes, todo o excesso de metal de solda seja removido. A menos que seja especificado de outra forma, o cordão de penetração pode ser deixado intacto dentro de tubos de pequeno diâmetro no lado oposto ao anterior. As fases finais de preparação devem ser obtidas por maquinagem ou retificação, tomando as precauções adequadas para evitar o endurecimento superficial por deformação ou o aquecimento excessivo do material. Dentro do comprimento l (ver figuras 42 a 44), no parágrafo do procedimento de ensaio), a superfície deve estar isenta de riscos ou incisões transversais à direção do provete, exceto no caso de entalhes, que não devem ser removidos a menos que a norma aplicável assim o exija.

Não se deve utilizar cisalhamento para amostras de aço com espessuras > 8 mm. Se se utilizar o corte térmico ou outros métodos de corte que possam afetar as superfícies cortadas para extrair o provete da chapa soldada ou do provete, os cortes devem ser efetuados a uma distância ≥ 3 mm do provete mas, em qualquer caso, em quantidade suficiente (dependendo do processo utilizado) para não introduzir efeitos metalúrgicos que possam afetar os resultados do ensaio.

Noutros materiais metálicos, não são permitidas superfícies cortadas por cisalhamento ou corte térmico em amostras curvadas; só pode ser utilizada maquinagem (por exemplo, serragem, retificação ou fresagem).

Na lista seguinte, a dimensão da amostra é dividida pelo tipo de ensaio:

- **TFBB e TRBB** (Ensaios transversais de dobragem de raiz e face de uma solda de topo a topo), ver Figuras 32 e 33
  - t_s = espessura do material de base próximo da junta soldada ou t (máx. 30 mm)
  - se t > 10 mm: t_s podem ser maquinados ou terminados mecanicamente de um lado até 10 ± 0,5 mm (ver figuras 32 e 33)

- A face ou a raiz da soldadura devem estar em tensão quando a amostra estiver dobrada
- Quando forem necessários t_s > 10 mm, podem ser colhidos vários provetes para cobrir toda a espessura da junta (ver figura 40); nesses casos, deve identificar-se a localização do provete na espessura da junta soldada.
- L_t deve ser igual ao valor exigido e satisfazer os requisitos das normas de aplicação adequadas
- Para placas planas: b ≥ 4·t_s, salvo especificação em contrário na norma de aplicação pertinente.
- Para tubos com D ≤ 50 mm: b = t + 0,1·D (b = 8 mm min)
- Para tubos com D > 50 mm: b = t + 0,05·D (8 mm < b < 40 mm)
- No caso dos tubos com D > 25·wt, o provete pode ser colhido conforme necessário para as placas planas
- r ≤ 0,2 t_s (3 mm máx.), na face em tensão e maquinado mecanicamente

- **SBB** (Ensaios de dobragem lateral transversal de uma junta de topo a topo soldada), ver Figura 34
  - b = espessura do material de base próximo da junta soldada ou t (máx. 30 mm), ver figura 34
  - T necessário > 10 ± 0,5 mm, salvo especificação em contrário na norma de aplicação
  - Quando ts > 40 mm, é admissível dividir o provete no plano da espessura do provete (ver figura 41), devendo, nesse caso, identificar-se a localização do provete na espessura da junta soldada.
  - Lt deve ser igual ao valor exigido e satisfazer os requisitos das normas de aplicação adequadas
  - r ≤ 0,2 ts (3 mm máx.), na face em tensão e maquinado mecanicamente

- **LFBB e LRBB** (Ensaio de dobragem longitudinal de uma soldadura de topo a topo), ver Figura 35
  - ts = espessura do material de base perto da junta soldada ou t (máx. 10 mm)
  - se t > 10 mm: ts pode ser maquinado ou terminado mecanicamente de um lado até 10 ± 0,5 mm (ver figura 35)
  - A face ou a raiz da soldadura devem estar em tensão quando a amostra estiver dobrada
  - Lt deve ser igual ao valor exigido e satisfazer os requisitos das normas de aplicação adequadas
  - b = Ls + 2·b 1 (em que b1 = 15 mm, salvo especificação em contrário na norma de aplicação e/ou por acordo entre as partes contratantes.)
  - r ≤ 0,2 ts (3 mm máx.), na face em tensão e maquinado mecanicamente

- **FBC** (Ensaios de dobragem de face de material de revestimento sem soldadura de topo a topo), ver Figura 36
  - ts = t w + tc (máx. 10 mm)
  - se t > 10 mm: t s podem ser maquinados ou terminados mecanicamente a partir do metal comum até 10 ± 0,5 mm (ver figura 36), se a espessura do revestimento o permitir (caso contrário, se tc < 10 mm)
  - Se (t w + t c) > 10 mm: é permitido remover o material de base para produzir um ts de acordo com a norma de aplicação ou conforme acordado entre as partes contratantes.
  - Lt deve ser igual ao valor exigido e satisfazer os requisitos das normas de aplicação adequadas

- Para placas planas: b ≥ 4·ts, salvo especificação em contrário na norma de aplicação.
- Para tubos com D ≤ 50 mm: b = t + 0,1·D (b = 8 mm min)
- Para tubos com D > 50 mm: b = t + 0,05·D (8 mm < b < 40 mm)
- No caso dos tubos com D > 25·wt, o provete pode ser colhido conforme necessário para as placas planas
- r ≤ 0,2 ts (3 mm máx.), na face em tensão e maquinado mecanicamente

- **SBC** (Ensaios de dobragem lateral de material de revestimento sem junta de topo a topo), ver Figura 37
  - b = t w + tc (máx. 50 mm)
  - ts = 10 ± 0,5 mm (salvo especificação em contrário na norma de aplicação)
  - Se (t w + tc) > 40 mm: é permitido remover o material de base para produzir um b, em conformidade com a norma de aplicação ou conforme acordado entre as partes contratantes.
  - Lt deve ser igual ao valor exigido e satisfazer os requisitos das normas de aplicação adequadas
  - r ≤ 0,2 ts (3 mm máx.), na face em tensão e maquinado mecanicamente

- **FBCB** (Ensaios de curvatura transversal da face de material de revestimento com uma solda de topo a topo), ver Figura 38
  - ts = tw + tc (máx. 10 mm)
  - se t > 10 mm: ts pode ser usiinados ou terminado mecanicamente do lado oposto do revestimento (ver figura 38) até 10 ± 0,5 mm, se a espessura do revestimento o permitir (caso contrário, se tc < 10 mm); nesse caso, a localização da soldadura deve permanecer no meio do provete ou numa posição adequada para o ensaio (ver figura 38)
  - Quando t > ts (neste caso: 10 mm máx.) e quando o ensaio disser respeito à junta completa que incorpora tanto a junta do topo como o revestimento, podem ser colhidos vários provetes a fim de cobrir toda a espessura da junta, tal como indicado na figura 40
  - Quando (tw + tc) > ts (neste caso: máx. 10 mm) e quando o objetivo do ensaio for examinar apenas o revestimento, não são necessários mais ensaios com o material de base.
  - Lt deve ser igual ao valor exigido e satisfazer os requisitos das normas de aplicação adequadas
  - Para placas planas: b ≥ 4·ts, salvo especificação em contrário na norma de aplicação pertinente.
  - Para tubos com D ≤ 50 mm: b = t + 0,1·D (b = 8 mm min)
  - Para tubos com D > 50 mm: b = t + 0,05·D (8 mm < b < 40 mm)
  - No caso dos tubos com D > 25·wt, o provete pode ser colhido conforme necessário para as placas planas
  - r ≤ 0,2 ts (3 mm máx.), na face em tensão e maquinado mecanicamente

- **SBCB** (Provetes de ensaio de curvatura lateral transversal para revestimento com soldadura de topo a topo), ver figura 39
  - b = tw + tc (máx. 50 mm)
  - ts = 10 ± 0,5 mm (salvo especificação em contrário na norma de aplicação pertinente)
  - A localização da soldadura deve permanecer no meio do provete ou numa posição adequada para o ensaio (ver figura 39)

- Se (t w + tc) > 40 mm: é permitido remover o material de base para produzir um b em conformidade com a norma de aplicação ou conforme acordado entre as partes contratantes.
- Quando t > ts (neste caso: 10 mm máx.) e quando o ensaio disser respeito à junta completa que incorpora tanto a junta do topo como o revestimento, podem ser colhidos vários provetes a fim de cobrir toda a espessura da junta, tal como indicado na figura 40
- Quando (tw + tc) > ts (neste caso: máx. 10 mm) e quando o objetivo do ensaio for examinar apenas o revestimento, não são necessários mais ensaios com o material de base
- Lt deve ser igual ao valor exigido e satisfazer os requisitos das normas de aplicação adequadas
- r ≤ 0,2 ts (3 mm máx.), na face em tensão e maquinado mecanicamente

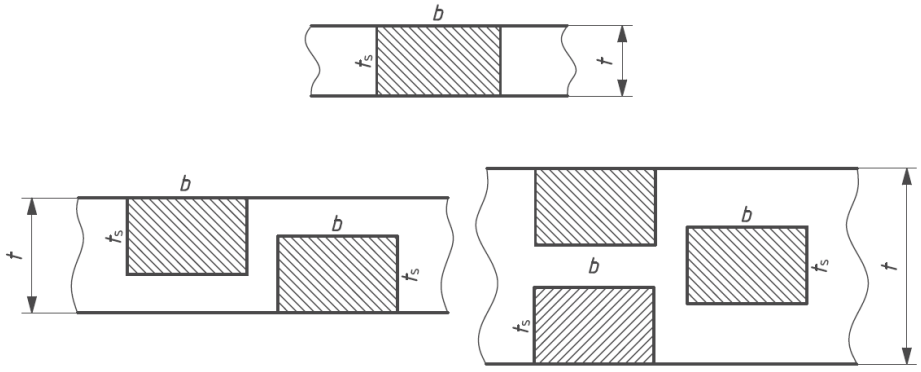


Figura 40: Amostras de ensaio de dobragem de raiz e face para uma solda de topo a topo (TFBB, TRBB, LFBB e LRBB).

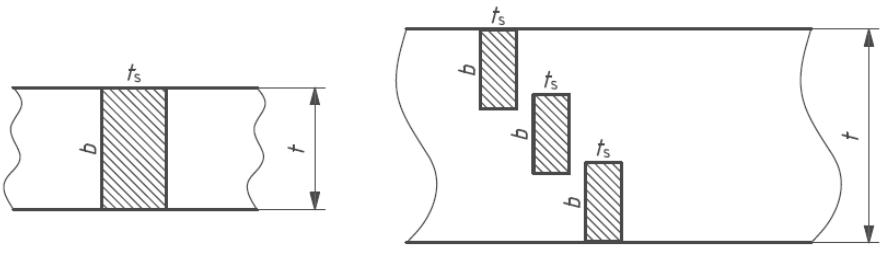


Figura 41: Amostras de ensaio de curvatura lateral para uma solda de topo a topo (SBB).

2.3.5. Procedimento de ensaio

Existem dois métodos principais para realizar um ensaio de curvatura: Teste com um dispositivo (ver Figuras de 42 a 45) e Teste com um rolo (Figura 46). Entre os métodos de "teste com um primeiro", há o dispositivo do tipo U sugerido para materiais finos e requer um dispositivo específico (ver figura

45). O ensaio de curvatura guiada com um rolo é um método alternativo de ensaio que pode ser utilizado para ligas de alumínio e para juntas noutros materiais em que o metal de soldadura, ou um dos materiais que estão a ser unidos, tem um ponto de rendimento ou resistência de prova inferior ao (outro) material de base.

Antes de iniciar o ensaio de dobragem com um primeiro, a forma e a posição da zona de fusão ou da linha de fusão podem ser estabelecidas por macrogravura ligeira da superfície do provete a ensaiar em tensão (ver ASTM E340 para mais informações sobre a macrogravura).

O ensaio com um dispositivo deve ser efetuado colocando o provete em dois suportes constituídos por rolos paralelos (ver figuras 42 a 44) ou dispositivos do tipo U (ver figura 45), devendo a soldadura situar-se no ponto médio entre os rolos, exceto para ensaios de curvatura longitudinal. O provete deve ser dobrado carregando gradual e continuamente no meio do vão, no eixo da soldadura, com uma carga aplicada por um dispositivo (flexão de três pontos) perpendicular à superfície do provete. O raio do êmbolo e da matriz para o dispositivo do tipo U deve estar de acordo com o quadro 9.

O ensaio com um rolo deve ser efetuado apertando firmemente uma extremidade do provete num dispositivo de ensaio com um rolo paralelo a um dispositivo. O provete deve ser dobrado carregando, gradual e continuamente, por meio da rotação do rolo exterior através de um arco centrado no eixo do primeiro.

O método de ensaio normalizado ISO 5173 não especifica qualquer velocidade de ensaio no que diz respeito ao ensaio com um dispositivo ou com um rolo; apenas a recomendação de carregar a amostra de forma gradual e contínua é necessária. Como procedimento geral, um tempo total de teste aproximado de 10/20 segundos para realizar um ensaio de curvatura é um bom ponto de partida para definir a velocidade de teste em conformidade.

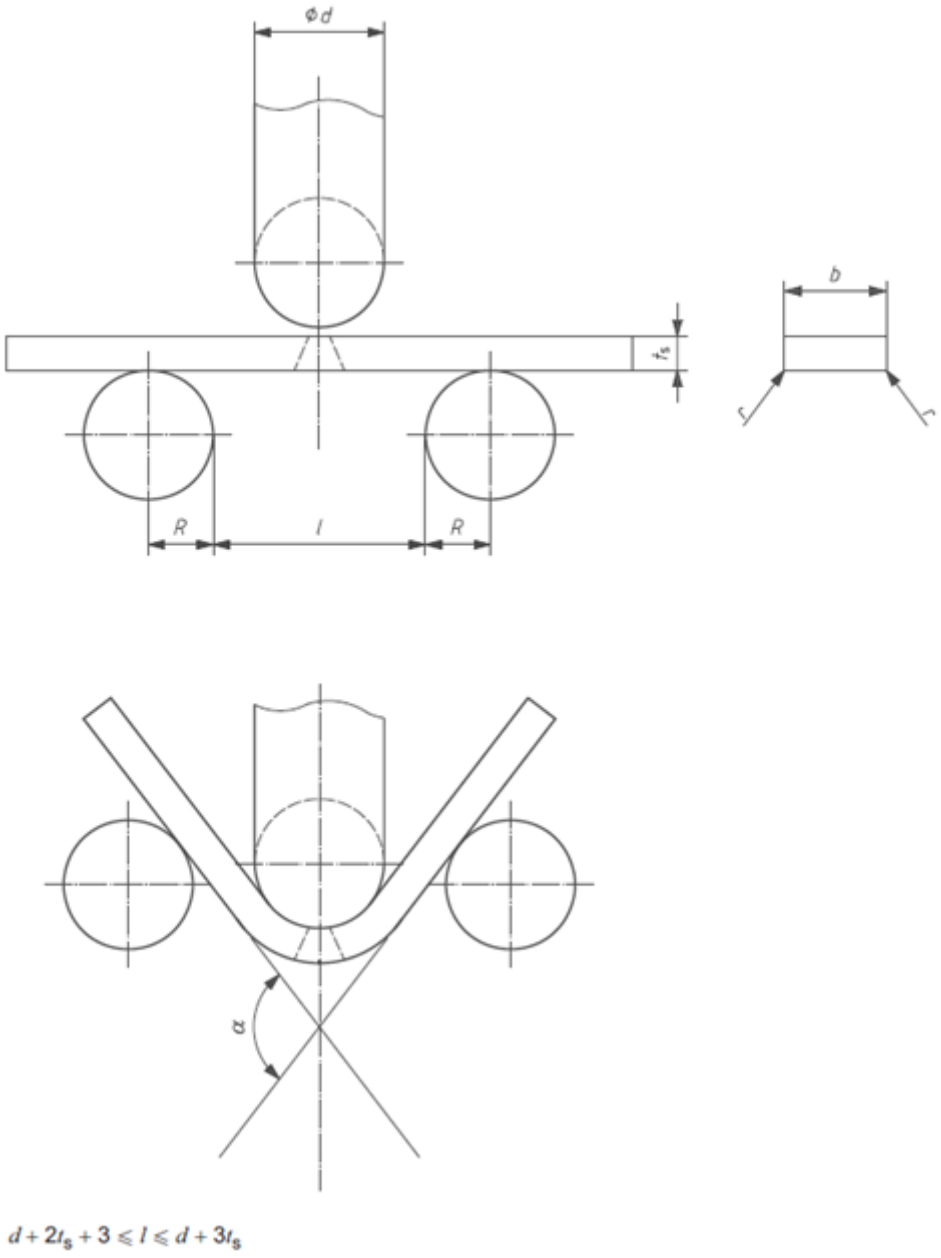
A distância entre os rolos é indicada nas figuras 42 a 44, enquanto o diâmetro do dispositivo e do rolo está relacionado com o alongamento (A) do metal original das amostras, determinado através do ensaio de tração (ver ISO 6892-1). Em particular, distinguem-se dois casos: materiais com $A < 20\%$ e materiais com $A \geq 20\%$, como mostra a Tabela 10.

O ensaio é concluído quando se atinge a definição de conclusão de ensaio dada na norma de aplicação (por exemplo, é atingido um ângulo de curvatura específico). Caso contrário, podem ser aplicadas as seguintes definições com base no tipo de ensaio realizado (com dispositivo ou com rolo):

- Figuras 42 a 44: o espécime é ejetado do fundo do equipamento;
- Figura 45: Não é possível inserir um fio de 3 mm entre a amostra e o dispositivo inferior;
- Figura 46: O rolo exterior foi deslocado 180° em relação ao ponto de partida.
- 6.6 Alongamento de dobragem

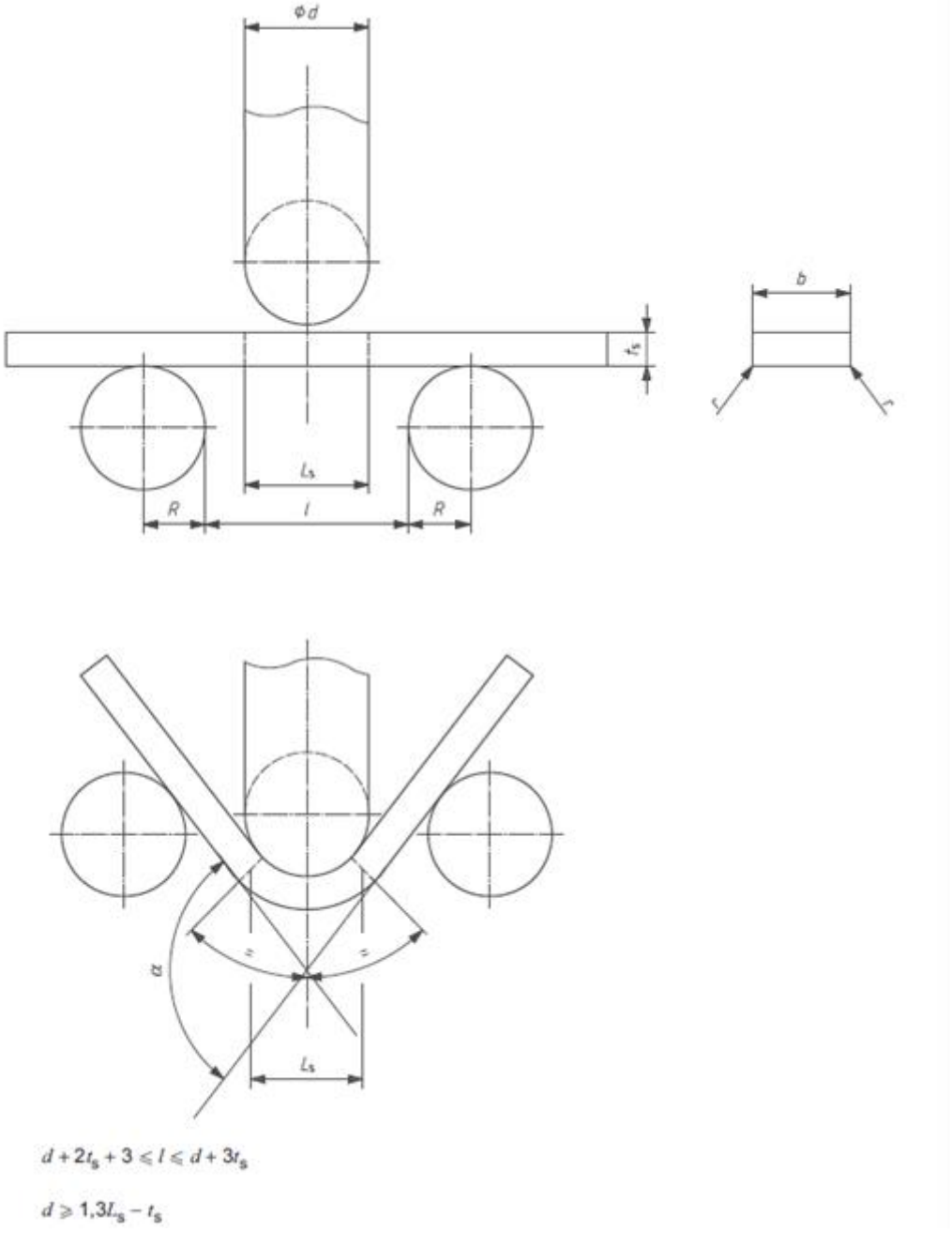
O ensaio de curvatura permite quantificar a ductilidade da amostra através da medição do alongamento, nesse caso, se este resultado for exigido, os provetes de aço devem ter um comprimento de dispositivo de acordo com as seguintes condições:

- Soldas de fusão: $L_0 = L_s$ ou $L_0 = 2 \cdot L_s$ ou $L_0 = L_s - t_s$
- Soldas por pressão, soldas por feixe de eletrões e soldas a laser: $L_0 = t_s$ ou $L_0 = 2 \cdot t_s$



$$d + 2t_s + 3 \leqslant l \leqslant d + 3t_s$$

Figura 42 – Ensaio de dobragem transversal de face ou raiz.



$$d + 2t_s + 3 \leqslant l \leqslant d + 3t_s$$

$$d \geqslant 1{,}3L_s - t_s$$

Figura 43 - Ensaio de dobragem lateral transversal.

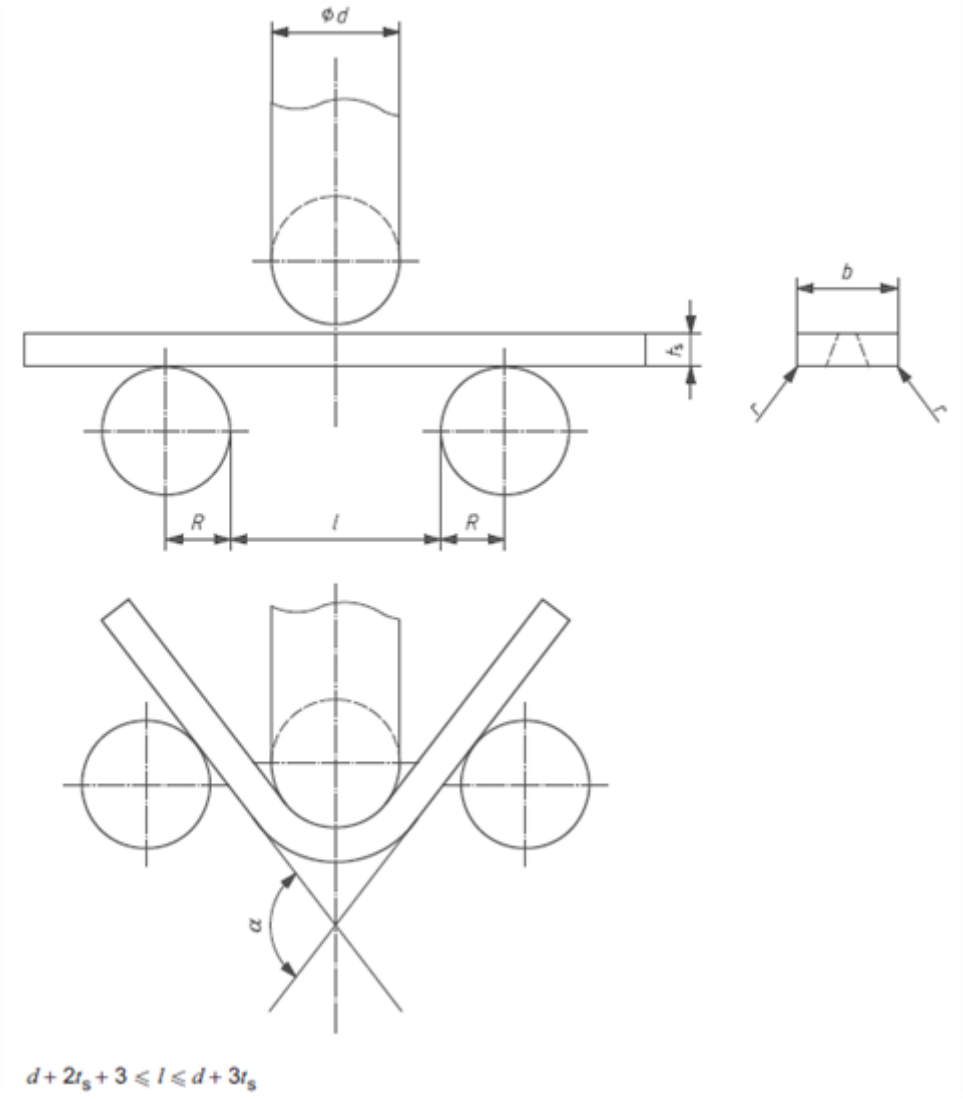
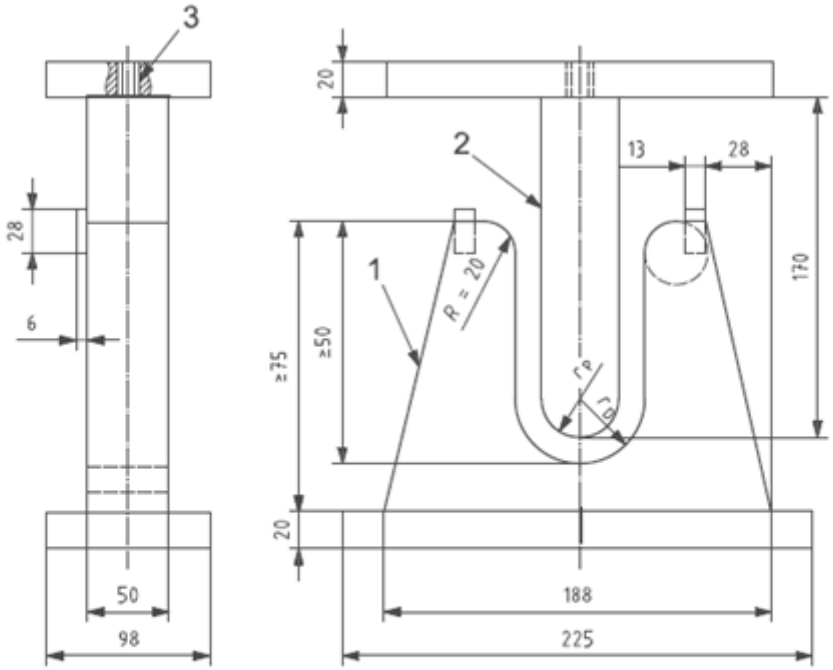


Figura 44 - Ensaio de dobragem longitudinal.

Dimensions in millimetres



Key

r_P plunger radius
r_D die radius
1 die
2 plunger
3 tapped hole for attaching plunger to test machine

Figura 45 - Exemplo de dispositivo em forma tipo U para o ensaio de dobragem de amostras finas.

Espessura da amostra [mm]	**Raio do êmbolo** [mm]	**Raio da matriz** [mm]
10	20	32
t_s	$2 \cdot t_s$	$r_p + t_s + 2$

Quadro 9 - Dimensões do equipamento — dispositivo do tipo U.

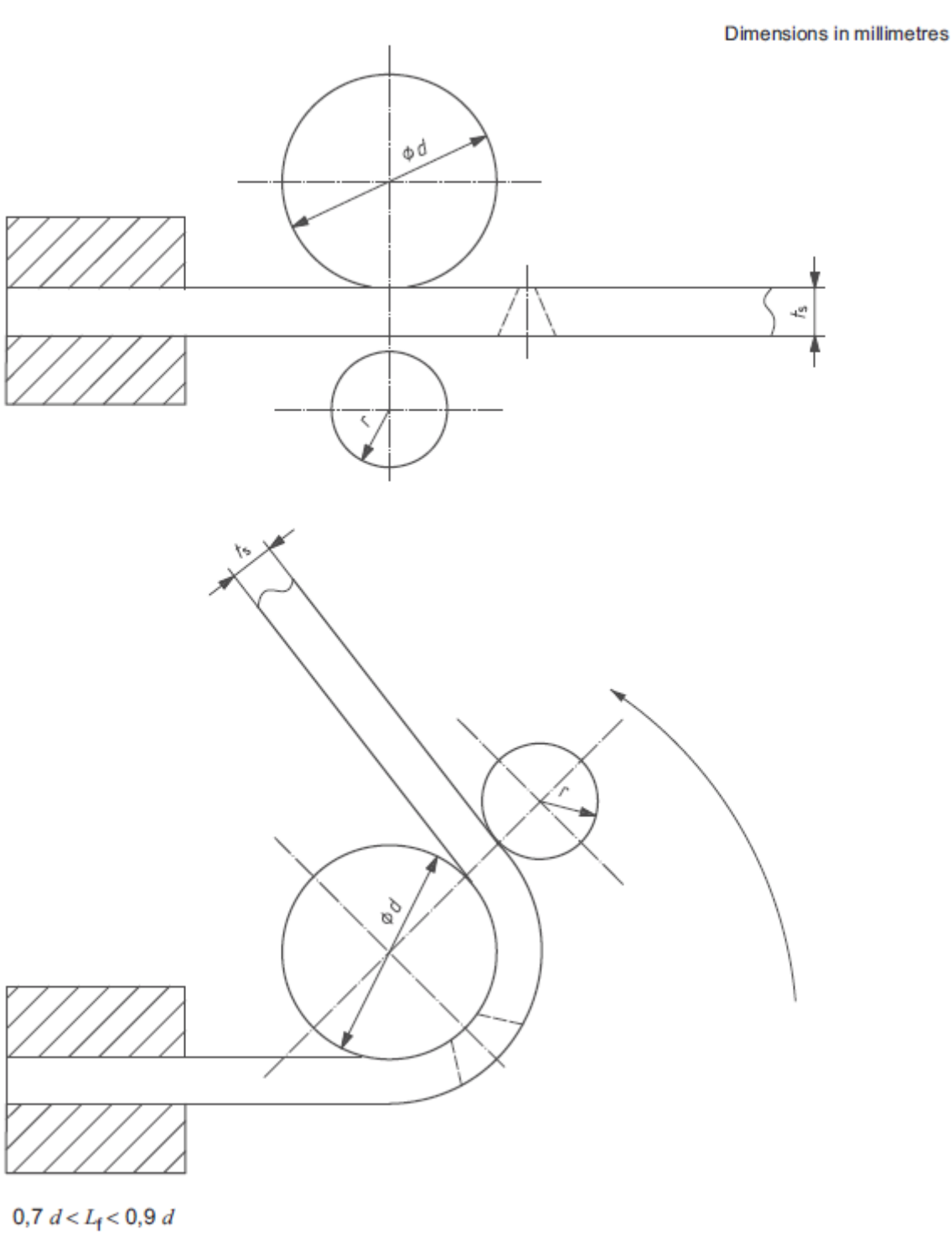


Figura 46 - Método de ensaio de dobragem com um rolo.

Alongamento do metal de origem, A [%]	**Diâmetro do dispositivo ou do rolo interno, d** [mm]
≥ 20	$4 \cdot t_s$
< 20	100·ts A − t_s

Tabela 10 - Diâmetro do dispositivo e do rolo.

2.3.6. Resultado do ensaio

Após a flexão, examinam-se tanto a superfície exterior como os lados do provete. A avaliação do provete de dobragem deve ser efetuada e comunicada em conformidade com a norma de aplicação aplicável (por exemplo, se for aplicada a norma ISO 15614-1, durante o ensaio, os provetes não devem revelar qualquer imperfeição > 3 mm em qualquer direção; as imperfeições que aparecem nos cantos dos provetes durante o ensaio devem ser ignoradas na avaliação).

2.3.7. Relatório de ensaio

Se for aplicada a norma ISO 5173, o relatório de ensaio deve incluir, no mínimo, as seguintes informações:

- referência ao método de ensaio normalizado aplicado com o ano de publicação, ou seja, ISO 5173;
- identificação do provete (marcação, tipo de material de base, tratamento térmico, etc.);
- forma e dimensões do provete;
- tipo e símbolo do ensaio de dobragem (raiz e face, transversal ou longitudinal, ensaio de dobragem transversal lateral);
- condições de ensaio (ver parágrafo "Procedimento de ensaio"):
- métodos de ensaio (dispositivo ou em rolo);
- diâmetro do dispositivo;
- distância entre rolos.
- temperatura de ensaio, se não estiver na gama de temperaturas (23 ± 5) °C;
- tipo e dimensões das imperfeições observadas;
- ângulo de dobragem.
- alongamento (se necessário)
- Um exemplo de um relatório de ensaio típico é dado no Exemplo 1.

2.3.8. Exemplo 1

Para ver um exemplo de um relatório típico de ensaio, consulte a Figura 47.

EXEMPLO DE UM RELATÓRIO DE ENSAIO

N.º .....

De acordo com pWPS.....

De acordo com resultado do ensaio "ensaio de flexão"

resultado do ensaio "....."

Fabricante: .....

Objetivo da examinação: .....

Forma do produto: .....

Material base: .....

Consumíveis: .....

Temperatura de Ensaio: .....

Tabela A. – Ensaio de flexão de acordo com a ISO 5173

Espécime Nº/ posição	Tipo de Ensaio	Dimensões mm	Diâmetro do Gabarito mm	Distância entre rolos mm	Ângulo de flexão (°)	Comprimento original do manómetro mm	Elongação %	Observações Ex.: aparência da fratura

Examinador ou organismo examinador:

.....

(nome, data e assinatura)

Aprovado por:

.....

(nome, data e assinatura)

Figura 47 - Exemplo de um relatório de ensaio de acordo com a norma ISO 9017.

2.3.9. Exemplo 2

Algumas imagens relacionadas com uma etapa diferente de um ensaio de dobragem são relatadas nas figuras a seguir, veja a Figura 48.

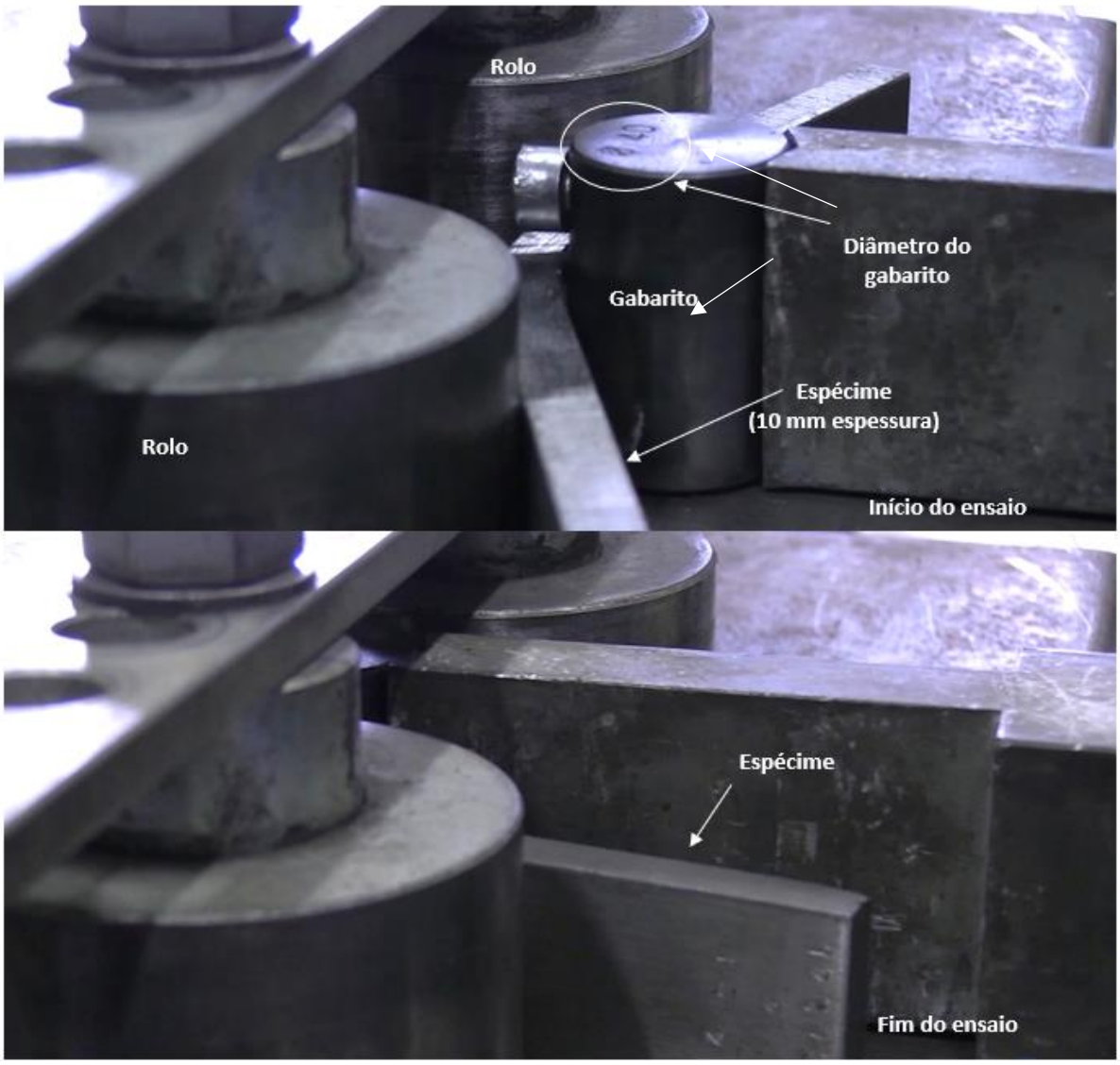


Figura 48 - Imagens do ensaio de dobragem: início (na parte superior) e fim (na parte inferior).

2.3.10. Exemplo 3

Nas imagens abaixo, duas amostras são relatadas: uma amostra sem imperfeição após o teste (resultados aceitáveis de acordo com a ISO 15614-1) e uma amostra reprovada (resultados não aceitáveis de acordo com a ISO 15614-1), ver Figura 49.



Figura 49sem imperfeições após o ensaio, ver imagem superior) e resultado não aceitável (amostra reprovada: imagem inferior) de acordo com a norma ISO 15614-1.

2.4. Ensaio de impacto Charpy de metais e juntas soldadas

2.4.1. Prefácio

O ensaio de impacto está relacionado com um ensaio em que a amostra é rompida instantaneamente através da carga dinâmica causada pelo impacto de um peso em queda; neste capítulo será introduzido e discutido o uso de um pêndulo Charpy para quebrar diferentes tipos de espécimes. Em particular, a principal referência deste capítulo é a ISO 148, que se concentra em amostras de entalhe V e U e descreve o método para determinar a energia absorvida num ensaio de impacto de materiais metálicos.

2.4.2. Referências

- ISO 148-1 Metallic materials - Charpy pendulum impact test - Part 1: Test method
- ISO 148-2 Metallic materials - Charpy pendulum impact test - Part 2: Verification of testing machines
- ISO 148-3 Metallic materials - Charpy pendulum impact test - Part 3: Preparation and characterization of Charpy V-notch test pieces for indirect verification of pendulum impact machines
- ISO 9016 - Destructive tests on welds in metallic materials - Impact tests - Test specimen location, notch orientation and examination
- SEP 1670 Determination of brittle-ductile transition temperature FATT and other characteristic properties
- ISO 286-1 Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits

2.4.3. Introdução

O âmbito do ensaio de impacto é determinar a tenacidade ao impacto de um material ou de uma solda através da medição da energia gasta para romper uma amostra entalhada. Tal resultado pode estar relacionado com a temperatura a que a amostra é testada, de facto, os materiais metálicos destacam um comportamento específico em relação à temperatura de ensaio e, dependendo do tipo de materiais (por exemplo, aços ferríticos), pode observar-se uma curva de transição da tenacidade ou vs. a temperatura.
O ensaio de impacto Charpy consiste em quebrar uma peça de teste entalhada com um único golpe de um pêndulo oscilante; O entalhe no provete tem uma geometria especificada e está localizado no meio entre dois suportes, oposto ao local que é impactado no ensaio. A energia absorvida no ensaio de impacto, a expansão lateral e o aspeto da fratura de cisalhamento são normalmente determinados. Dado que os valores de impacto de muitos materiais metálicos variam com a temperatura, os ensaios devem ser efetuados a uma temperatura especificada. Se esta temperatura não for ambiente, o provete deve ser aquecido ou arrefecido a essa temperatura, em condições controladas. Através destes resultados podem ser desenhadas curvas para observar o comportamento de um material vs. temperatura; diferentes métodos estão disponíveis para ajustar os pontos de dados experimentais, portanto, neste capítulo, a técnica sugerida pelo SEP 1670 será examinada e descrita.
Além disso, a posição e a orientação onde a amostra é colhida são muito importantes e têm de ser especificadas no relatório de ensaio para relacionar adequadamente o resultado com a posição específica da amostra. Além disso, a posição do entalhe é importante, no caso de uma soldadura, o entalhe pode ser colocado na proximidade da linha de fusão, no metal de solda ou na zona afetada pelo calor. Portanto, os resultados obtidos a partir da mesma solda variam dependendo da posição do entalhe. A norma ISO 9016 ajuda a identificar a posição onde um espécime é retirado e onde o entalhe é colocado em relação à soldadura.

O ensaio de impacto do pêndulo Charpy é frequentemente usado em testes de rotina aceitação de aprovação/reprovação de alto rendimento em ambientes industriais. Para estes ensaios, pode não ser importante saber se a amostra de ensaio está completamente partida, parcialmente partida ou simplesmente deformada plasticamente e arrastada através das bigornas. Em ambientes de investigação, design ou académicos, os valores de energia medidos são estudados em mais detalhe, casos em que pode ser altamente relevante se a amostra está quebrada ou não.
É importante notar que nem todos os resultados do ensaio de impacto do pêndulo Charpy podem ser comparados diretamente. Por exemplo, o teste pode ser realizado com martelos com golpes de raios diferentes, ou com diferentes formas de peça de teste. Testes realizados com diferentes martelos podem dar resultados diferentes, e os resultados de testes obtidos com peças de teste de formas diferentes também podem. É por isso que não só a adesão à ISO 148, mas também um relatório claro e completo do tipo de instrumento, da peça de ensaio e dos detalhes das peças de teste pós-teste são cruciais para a comparabilidade dos resultados.
No quadro seguinte, a lista de termos adotados na norma ISO I48-1 é apresentada juntamente com a respetiva unidade e descrições (ver Tabela 11).
Na Figura 50 é apresentado um esboço de um pêndulo Charpy com a imagem de um pêndulo num laboratório, enquanto na Figura 51 a terminologia da peça de ensaio mostra a configuração dos suportes da peça de ensaio e bigornas de uma máquina de ensaio de impacto pendular.

Denominação	Unidade	Descrição
W	mm	espessura do provete
h	mm	largura do provete
l	mm	comprimento do provete
α	°	ângulo de queda do pêndulo
$ß_1$	J ou °	ângulo de subida quando a máquina é acionada normalmente, sem o provete em posição
$ß_2$	J ou °	ângulo de subida quando a máquina funciona normalmente, sem um provete em posição e sem repor o mecanismo de indicação
LE	mm	expansão lateral
K	J ou °	energia absorvida (expressa em KV 2, KV 8, KU $_2$, KU_8, para identificar geometrias de entalhe específicas e o raio da aresta de impacto)
K_1	J ou °	energia absorvida indicada quando a máquina funciona normalmente sem um provete na posição
K_2	J ou °	energia absorvida indicada quando a máquina funciona normalmente, sem um provete em posição e sem voltar a pôr o mecanismo de indicação
K_N	J	energia potencial inicial nominal (energia atribuída pelo fabricante da máquina de ensaio de impacto pendular)
K_p	J	energia potencial inicial (energia potencial)
KV_2	J	energia absorvida para uma peça de teste de entalhe em V usando um martelo de 2 mm
KV_8	J	energia absorvida para uma peça de teste de entalhe em V usando um martelo de 8 mm
KU_2	J	energia absorvida para uma peça de teste de entalhe em U usando um martelo de 2 mm
KU_8	J	energia absorvida para uma peça de teste de entalhe em U usando um martelo de 8 mm
F	N	Força relacionada com o peso do peso em queda (martelo

l_2	N	Duração do dano ao qual o peso em queda está ligado
M	N·m	Momento igual ao produto $F \cdot l_2$
p	J	perda de energia absorvida causada pelo atrito do ponteiro
p'	J	perda de energia absorvida causada pelo atrito do rolamento e resistência ao ar
$p_{ß}$	J	correção das perdas de energia absorvida por um ângulo de subida $ß$
AFS	%	aparência de fratura de cisalhamento
Ti	°C	temperatura de transição
T_{t27}	°C	temperatura de transição definida a um valor específico de energia absorvida; por exemplo, Z7 J
$T_{t50\,\%US}$	°C	temperatura de transição definida a uma determinada percentagem da energia absorvida da prateleira superior; por exemplo, 50 %
$T_{t50\,\%SFA}$	°C	temperatura de transição definida numa determinada proporção de fratura de cisalhamento; por exemplo, 50 %
$T_{t0,9}$	°C	temperatura de transição definida a uma determinada quantidade de expansão lateral; por exemplo, 0,9 mm

Tabela 11 - Lista de termos e definições extraídos da ISO 148-1.

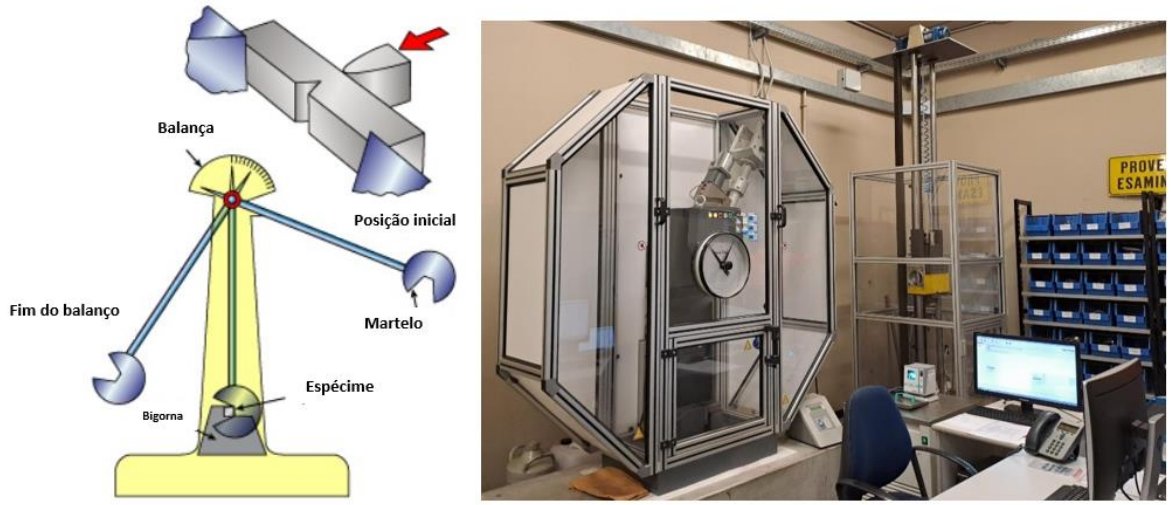
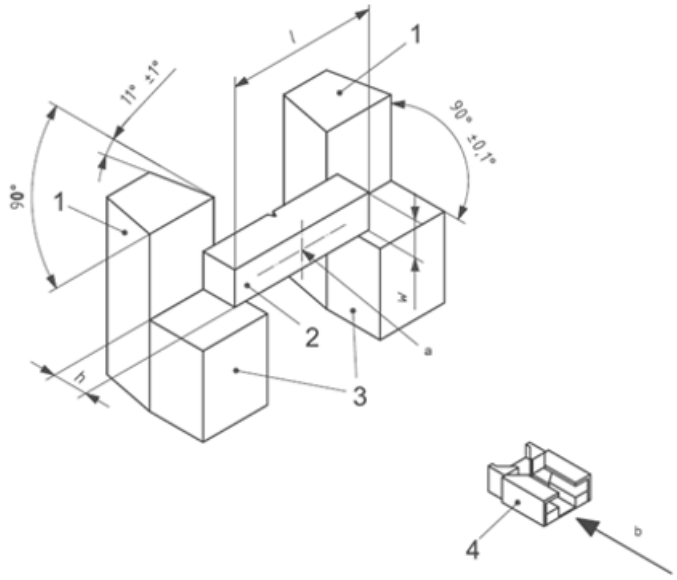


Figura 50 - Esboço de um pêndulo Charpy (à esquerda) e imagem de um pêndulo num laboratório (à direita, cortesia do IIS).



Legenda

1 bigorna
2 amostra de ensaio de tamanho padrão
3 suporte da amostra de ensaio
4 proteção

h altura da amostra de ensaio
l comprimento da amostra de ensaio
w largura da amostra de ensaio
a Centro do martelo
b Direção do balanço do pêndulo

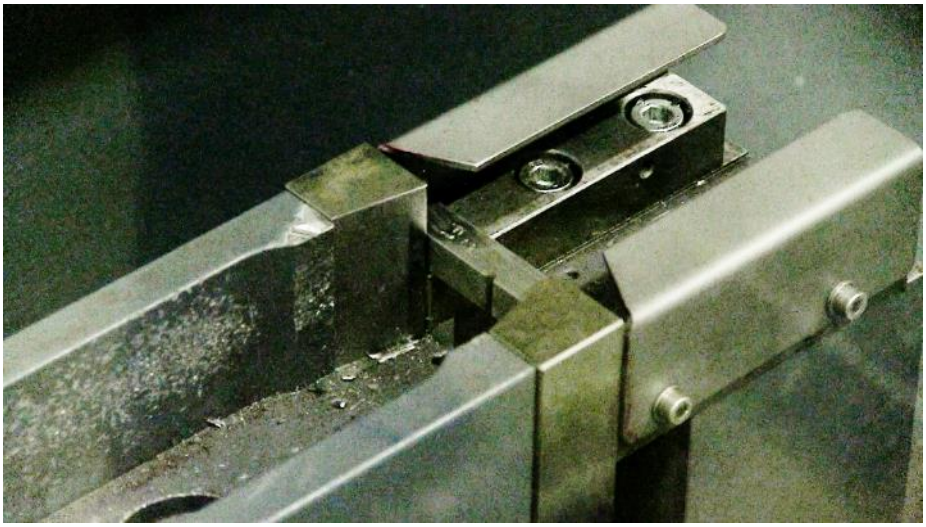


Figura 51 - No topo: Terminologia do provete mostrando a configuração dos suportes e bigornas de uma máquina de ensaio de impacto pendular; na parte inferior: imagem das bigornas de suporte com provete montado antes do impacto com o martelo (a seta branca indica a direção e o lado do impacto no provete).

2.4.4. Provetes de ensaio

O provete padrão para o ensaio de impacto, de acordo com a norma ISO 148-1, tem 55 mm de comprimento e uma secção quadrada de 10 x 10 mm: no centro do comprimento, deve existir um entalhe em V ou um entalhe em U. O entalhe em V deve ter um ângulo incluído de 45°, uma profundidade de 2 mm e um raio radicular de 0,25 mm, enquanto o entalhe em U deve ter uma profundidade de 5 mm

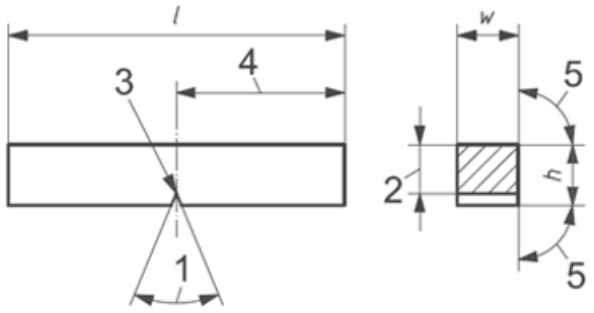
(salvo indicação em contrário) e um raio radicular de 1 mm (ver Figura 52 e Tabela 12). Na Figura 53 a medição do raio radicular num entalhe em V é realizada através do software de um microscópio ótico.

Se o provete-padrão não puder ser obtido a partir do material, deve utilizar-se, salvo indicação em contrário, um dos provetes de subdimensão, com espessuras de 7,5 mm, 5 mm ou 2,5 mm (ver Figura 51 e Tabela 12). Note-se que a comparação direta dos resultados só é significativa quando efetuada entre provetes da mesma forma e dimensões. Além disso, para energias baixas, o uso de calços para melhor posicionar peças de teste de subdimensão em relação ao centro do martelo é importante para evitar a absorção excessiva de energia pelo pêndulo. Para altas energias, isso pode não ser tão importante. Podem colocar-se calços sobre ou sob os suportes da peça de ensaio, de forma a que a espessura média da amostra se situe 5 mm acima dos suportes de 10 mm. Os calços podem ser fixados temporariamente aos suportes usando fita adesiva ou outro meio.

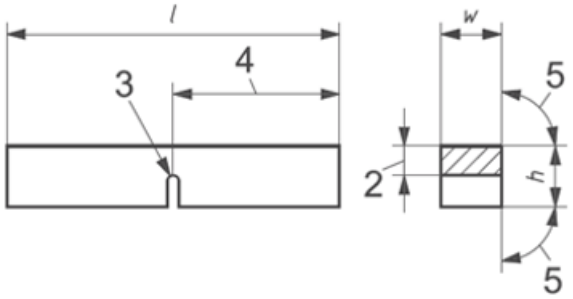
Quando um material tratado termicamente estiver a ser avaliado, o provete deve ser acabado e entalhado após o tratamento térmico final, a menos que se possa demonstrar que a maquinagem antes do tratamento térmico não afeta os resultados dos ensaios.

A preparação deve ser executada de modo a minimizar qualquer modificação do provete, devido, por exemplo, ao aquecimento ou ao trabalho a frio; O provete pode ser marcado em qualquer face que não esteja em contacto com suportes, bigornas ou martelo e numa posição em que a deformação plástica e as descontinuidades superficiais causadas pela marcação não afetem a energia absorvida.

O provete pode ser maquinado a partir de um material de base (por exemplo, uma placa ou uma peça) ou de uma soldadura, neste último caso, aplica-se a norma ISO 9016 para identificar corretamente o local onde os provetes são extraídos da soldadura e a posição exata do entalhe em relação à zona afetada pelo calor, o metal de soldadura, a tampa ou a raiz da soldadura.



a) Geometria do entalhe em V



b) Geometria do entalhe em U

Figura 52 - Peça de ensaio de impacto do pêndulo Charpy; Para os símbolos L, W, B e os números 1 a 5, ver Tabela 12.

Designação	Símbolo e nº	Peça de teste com entalhe em V			Peça de teste com entalhe em U		
		Dimensão nominal	Tolerância à maquinagem	Classe de tolerância[a]	Dimensão nominal	Tolerância à maquinagem	Classe de tolerância[a]
Comprimento	*l*	55 mm	± 0,60 mm	js15	55 mm	± 0,60 mm	js15
Largura	*h*	10 mm	± 0,075 mm	js12	10 mm	± 0,11 mm	js13
Espessura[c] • *provete padrão* • *Peça de ensaio de subtamanho* • *Peça de ensaio de subtamanho* • *Peça de ensaio de subtamanho*	*W*	 10 mm 7,5 mm 5 mm 2,5 mm	 ± 0,11 mm ± 0,11 mm ± 0,06 mm ± 0,05 mm	 js13 js13 js12 js12	 10 mm 7,5 mm 5 mm ---	 ± 0,11 mm ± 0,11 mm ± 0,06 mm ---	 js13 --- --- ---
Ângulo de entalhe	*1*	45°	± 2°	---	---	---	---
Ligamento	*2*	8 mm	± 0,075 mm	js12	5 mm	± 0,09 mm	js13
Raio de entalhe	*3*	0,25 mm	± 0,025 mm	---	1 mm	± 0,07 mm	js12
Posição do entalhe (centralização)	*4*	27,5 mm	± 0,42 mm[d]	js15	27,5 mm	± 0,42 mm[d]	js15
Ângulo entre o plano de simetria do entalhe e o eixo longitudinal do provete		90°	± 2°	---	90°	± 2°	---
Ângulo entre faces longitudinais adjacentes do provete	*5*	90°	± 2°	---	90°	± 2°	---
Rugosidade superficial[b]	NA	< 5 µm	---	---	< 5 µm	---	---

[a] De acordo com a norma ISO 286-1,
[b] Os provetes devem ter uma rugosidade superficial superior a Ra 5 ¡rm, exceto no que se refere às extremidades,
[c] Se outra espessura (2 mm ou 3 mm) estiver especificada, devem também ser especificadas as tolerâncias correspondentes.
[d] No caso das máquinas com posicionamento automático do provete, recomenda-se que a tolerância seja tomada como ± 0,165 mm em vez de ± 0,42 mm,

Tabela 12 - Tolerâncias relativas às dimensões especificadas do provete.

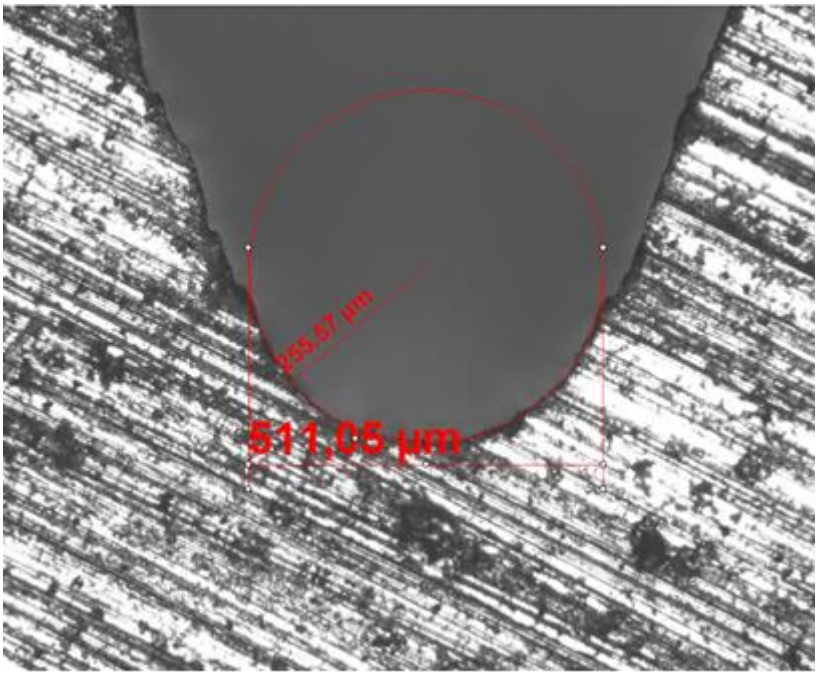


Figura 53 - Verificação do raio de entalhe com microscópio ótico.

2.4.5. Procedimento de ensaio

As medições dos dados do instrumento e do provete devem ser rastreáveis de acordo com as normas nacionais ou internacionais. O equipamento utilizado para as medições deve ser calibrado a intervalos adequados (a máquina de ensaio deve ser instalada e verificada em conformidade com a norma ISO 148-2).

A geometria do martelo deve ser especificada como sendo o de 2 mm ou o de 8 mm. Recomenda-se que o raio no martelo seja mostrado como um subscrito da seguinte forma: KV 2 ou KV 8 e KU_2 ou KU_8. Deve ser feita referência na especificação de produto sobre a geometria do martelo (note que os ensaios realizados com martelos de 2 mm e 8 mm podem dar resultados diferentes, ver ISO 148-1).

Salvo indicação em contrário, os ensaios devem ser efetuados a 23 °C ± 5 °C (temperatura ambiente) e, se for especificada uma temperatura, o provete deve ser condicionado a uma temperatura de ± 2 °C. Para o condicionamento (aquecimento ou arrefecimento) com recurso a um líquido de cobertura, o provete deve ser colocado num recipiente sobre uma grelha que se situe, pelo menos, 25 mm acima do fundo do recipiente, coberta por pelo menos 25 mm de líquido e a pelo menos 10 mm dos lados do recipiente; O meio deve ser constantemente agitado e levado à temperatura especificada por qualquer método conveniente. O dispositivo utilizado para medir a temperatura do meio deve ser colocado no centro do conjunto de provetes e a temperatura do meio deve ser mantida à temperatura

especificada dentro de ± 1 °C durante, pelo menos, 5 minutos (se a diferença entre a temperatura do provete e a temperatura de ensaio for superior a 40 °C (por exemplo, provete a arrefecer da temperatura ambiente a -40 °C); sugere-se esperar pelo menos 10/15 minutos para se certificar de que as peças de teste estão uniformemente condicionadas ao longo da espessura).

Quando um meio líquido se aproxima do seu ponto de ebulição, o arrefecimento por evaporação pode reduzir drasticamente a temperatura do provete durante o intervalo entre a remoção do líquido e a fratura. Para o condicionamento (aquecimento ou arrefecimento) por meio gasoso, o provete deve ser colocado numa câmara a pelo menos 50 mm da superfície mais próxima. Os provetes individuais devem estar separados por pelo menos 10 mm. O meio deve circular constantemente e ser levado à temperatura especificada por qualquer método conveniente; o dispositivo utilizado para medir a temperatura do meio deve ser colocado no centro do grupo de provetes, a temperatura do meio gasoso deve ser mantida à temperatura especificada dentro de ± 1 °C durante, pelo menos, 30 minutos antes de o provete ser retirado do meio para ensaio.

São permitidos outros métodos de aquecimento ou arrefecimento, se forem cumpridos os outros requisitos pertinentes (acima referidos).

Se o ensaio for realizado a uma temperatura diferente da temperatura ambiente, não devem decorrer mais de 5 segundos entre o momento em que o provete é retirado do meio de aquecimento ou arrefecimento e o momento em que é atingido pelo martelo. É exceção se a diferença entre a temperatura ambiente ou do instrumento e a temperatura do provete for inferior a 25 °C, caso em que o tempo de transferência da amostra deve ser inferior a 10 s. O dispositivo de transferência deve ser concebido e utilizado par a que a temperatura do provete se mantenha dentro da gama de temperaturas permitida. As partes do dispositivo em contacto com a amostra durante a transferência do meio para a máquina devem ser condicionadas com as amostras.

Deve ter-se o cuidado de assegurar que o dispositivo utilizado para centrar o provete nas bigornas não provoque a repercussão das extremidades fraturadas dos provetes de baixo consumo energético e de alta resistência para o pêndulo. Esta interação pêndulo/peça de ensaio resulta erroneamente em energia alta indicada. Demonstrou-se que a folga entre a extremidade de um provete na posição de ensaio e o dispositivo de centragem, ou uma parte fixa da máquina, deve ser igual ou superior a 13 mm, a fim de evitar que as extremidades dos provetes voltem a penetrar no pêndulo durante o ensaio.

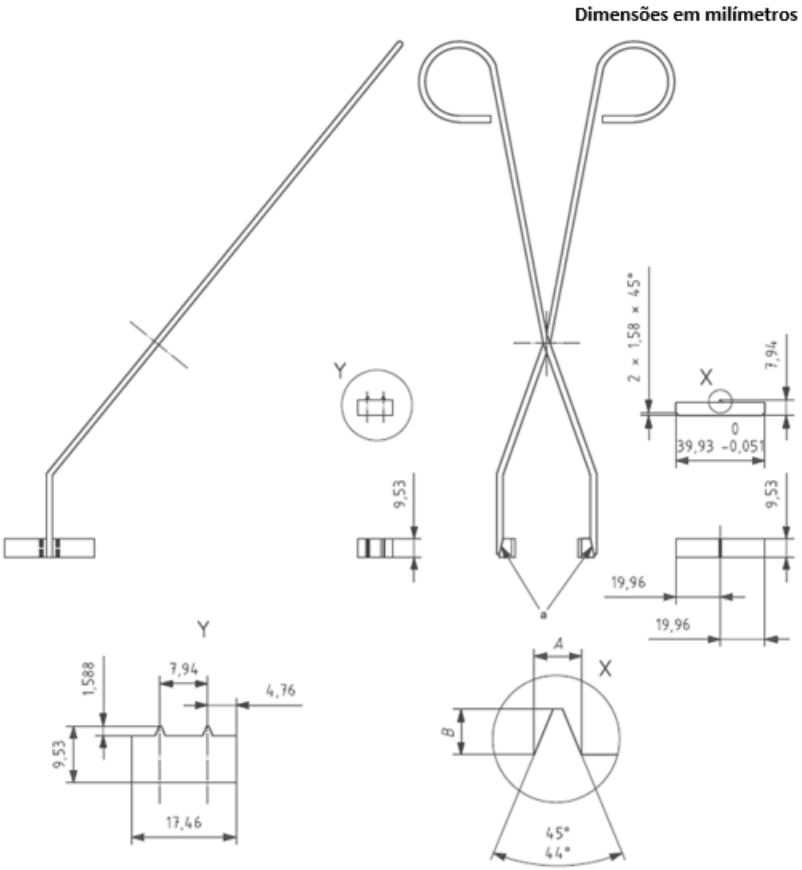
As pinças autocentrantes, semelhantes às representadas na Figura 54 para peças de ensaio com entalhe em V, são frequentemente utilizadas para transferir o provete do meio de condicionamento da temperatura para as posições de ensaio adequadas; pinças desta natureza eliminam potenciais problemas de depuração devido à interferência entre as metades da amostra fraturadas e um dispositivo de centragem fixo.

A energia absorvida, K, não deve exceder 80 % da energia potencial inicial, K_p. Se a energia absorvida exceder este valor, a energia absorvida deve ser comunicada como aproximada, devendo ser indicada no relatório de ensaio como excedendo 80 % da capacidade da máquina. Idealmente, um ensaio de impacto seria realizado a uma velocidade de impacto constante. Num teste do tipo pêndulo, a velocidade diminui à medida que a fratura progride. Para espécimes com energias de impacto próximas da capacidade do pêndulo, a velocidade do pêndulo diminui durante a fratura até o ponto em que energias de impacto precisas não são mais obtidas.

Os provetes nem sempre se partem em duas partes durante o ensaio; para testes de aceitação de material, não é necessário comunicar informações relativas a fraturas incompletas. Para os ensaios, com exceção dos ensaios de aceitação de materiais, é necessário que os provetes ininterruptos sejam comunicados.

No caso de amostras individuais não serem identificadas nos registos de ensaio, o grupo pode ser identificado como quebrado ou intacto. Um provete que não esteja totalmente separado em duas metades de ensaio após o impacto pode ser considerado partido se as duas metades puderem ser separadas empurrando as metades articuladas juntas sem o auxílio de ferramentas mecânicas e sem fatigar a amostra. Um teste de aceitação de material é um teste que é usado para avaliar um requisito mínimo de aceitação.

Se um provete encravar na máquina, os resultados não devem ser tidos em conta e a máquina deve ser cuidadosamente verificada quanto a danos que possam afetar o seu estado de calibração. Note que a obstrução ocorre quando um provete partido é apanhado entre as partes móveis e não móveis da máquina de ensaio. Pode resultar numa absorção de energia significativa. A obstrução pode ser diferenciada das marcas de ataque secundárias, porque a obstrução está associada a um par de marcas opostas no espécime.



Largura do espécime	Largura de base *A*	Altura *B*
10	1,60 até 1,70	1,52 até 1,65
5	0,74 até 0,80	0,69 até 0,81
3	0,45 até 0,51	0,36 até 0,48

a Peças em aço soldadas a prata em pinças paralelas entre si

Figura 54 - Pinças de centragem para espécimes Charpy com entalhe em V.

2.4.6. Resultado do ensaio

Se a inspeção pós-fratura revelar que uma parte da marcação de identificação da amostra se encontra numa parte do provete visivelmente deformada, o resultado do ensaio pode não ser representativo do material, o que deve ser registado no relatório de ensaio.

A medida da capacidade do material de resistir à fratura quando submetido a tensões triaxiais, como as que estão na raiz do entalhe de uma peça de ensaio Charpy, é a quantidade de deformação que ocorre neste local (neste caso: contração). Devido às dificuldades em medir esta deformação, mesmo

após a fratura, a expansão que ocorre na extremidade oposta do plano de fratura é habitualmente medida e usada como aproximação para a contração.

O método de medição da expansão lateral (LE) deve ter em conta o facto de o plano de fratura raramente intercetar o ponto de expansão máxima em ambos os lados de uma peça de ensaio. Uma metade de um provete partido pode incluir a expansão máxima para ambos os lados, apenas para um lado, ou para nenhum deles; as técnicas utilizadas devem, por conseguinte, fornecer um valor de expansão, igual à soma do maior dos dois valores obtidos para cada lado, medindo as duas metades separadamente. Deve medir-se a quantidade de expansão de cada lado de cada metade em relação ao plano definido pela parte não deformada do lado do provete (ver Figura 57). Métodos de contacto e sem contacto podem ser usados para essas medições. A expansão lateral pode ser medida utilizando um calibre semelhante ao apresentado nas Figuras 55 e 56, medindo individualmente as duas metades partidas. Primeiro, no entanto, verifique os lados perpendiculares ao entalhe para garantir que nenhuma rebarba foi formada nesses lados durante o ensaio de impacto; se existirem rebarbas, devem ser removidas, por exemplo esfregando com um pano de esmeril, certificando-se de que as saliências a medir não são esfregadas durante a remoção da rebarba. Em seguida, coloque os meios-espécimes juntos de modo que as superfícies originalmente opostas ao entalhe estejam voltadas uma para a outra. Pegar numa das meias-amostras (ver Figura 55) e pressioná-la firmemente contra os suportes de referência, com as saliências contra a bigorna do calibre. Anote a leitura e, em seguida, repita este passo com a outra meia amostra (ver Figura 55), assegurando que o mesmo lado é medido; O maior dos dois valores é a expansão desse lado do provete partido. Repita este procedimento para medir as saliências do lado oposto e, em seguida, adicione os valores maiores obtidos para cada lado. Por exemplo, se $A_1 > A_2$ e $A_3 = A_4$, consequentemente LE = A_1 + (A_3 ou A_4). Se $A_1 > A_2$ e $A_3 > A_4$, consequentemente, LE = $A_1 + A_3$. Se uma ou mais saliências de um provete tiverem sido danificadas por contacto com a bigorna, a superfície de montagem da máquina, etc., o provete não deve ser medido e as condições devem ser indicadas no relatório de ensaio.

A superfície de fratura das peças de ensaio Charpy é frequentemente classificada pela percentagem de fratura por cisalhamento que ocorre. Quanto maior a percentagem de fratura de cisalhamento, maior a tenacidade do entalhe do material. A superfície de fratura da maioria dos espécimes de Charpy exibe uma mistura de regiões de cisalhamento e fratura plana. Assume-se que as regiões de cisalhamento são totalmente dúcteis, mas as regiões de fratura plana podem ser dúcteis, frágeis ou uma combinação desses modos de fratura. Como a classificação é extremamente subjetiva, recomenda-se que não seja usada em especificações. NOTA: O termo aparência de fratura fibrosa é frequentemente

usado como sinônimo de aparência de fratura de cisalhamento. Os termos clivagem, aparência da fratura e cristalinidade são frequentemente usados para expressar o oposto da fratura por cisalhamento.

A percentagem de fratura por cisalhamento é geralmente determinada por qualquer um dos seguintes métodos:

A. medir o comprimento e a largura da porção de clivagem (a porção "brilhante") da região plana da fratura, conforme indicado na Figura 57, e determinar a percentagem de cisalhamento da Tabela 13;
B. comparar o aspeto da fratura do provete com um gráfico do aspeto da fratura, como o apresentado nas Figuras 58 e 59;
C. ampliar a superfície da fratura e compará-la com um gráfico de sobreposição recalibrado, ou medir a percentagem de fratura de clivagem através de um planímetro e, em seguida, calcular a percentagem de fratura de cisalhamento (como 100% de fratura de clivagem);
D. fotografar a superfície da fratura com uma ampliação adequada e medir a percentagem de fratura de clivagem com um planímetro e, em seguida, calcular a percentagem de fratura de cisalhamento (como 100 % de fratura de clivagem);
E. medição da percentagem de fratura por cisalhamento através de técnicas de análise de imagem.

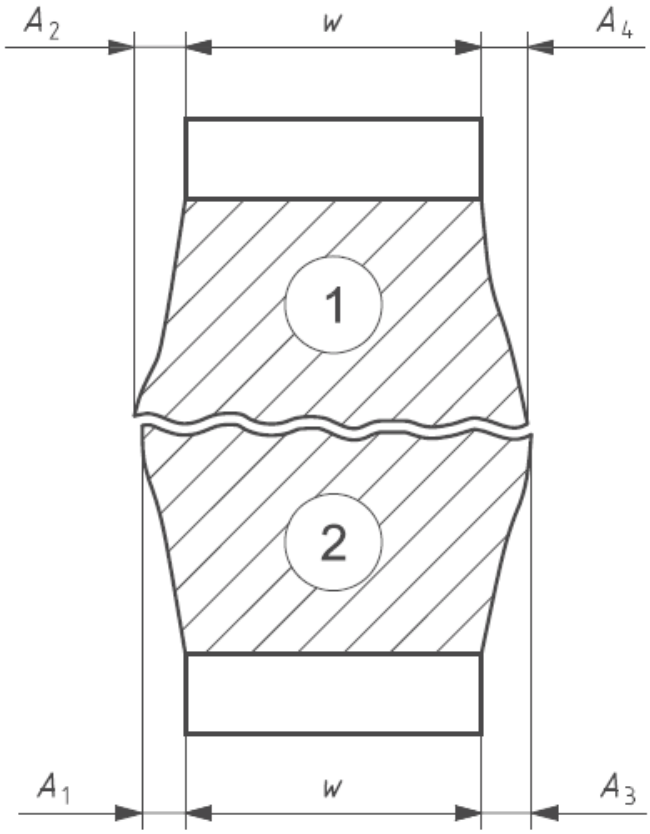


Figura 55 - Metades do espécime de impacto Charpy com entalhe em V quebrado, ilustrando a medição da expansão lateral, dimensões A_1, A_2, A_3, A_4 e a largura original, dimensão W. Observe que as metades são numeradas 1 e 2.

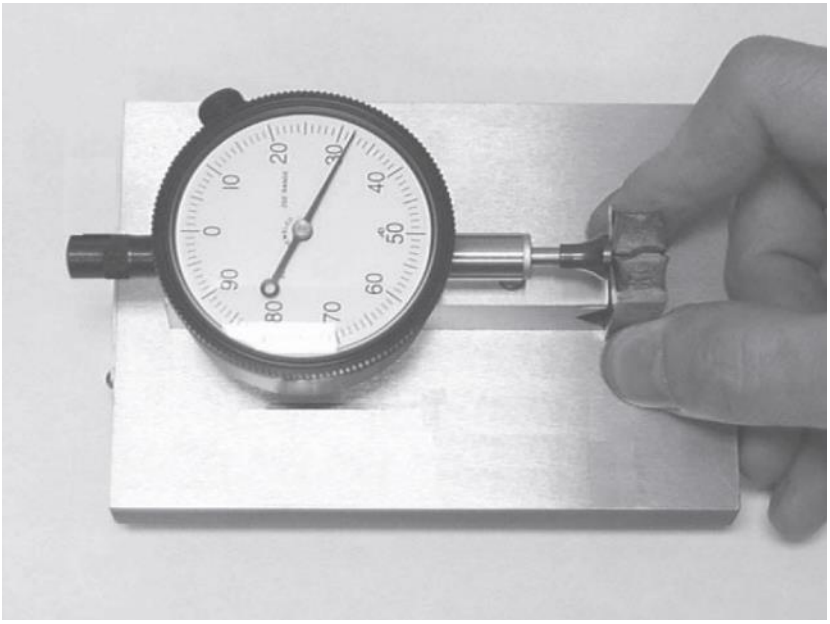
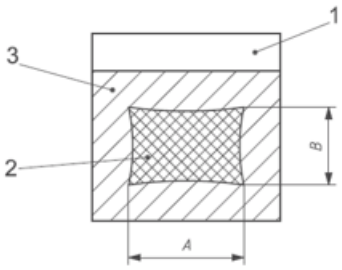


Figura 56 Manómetro de expansão lateral para amostras Charpy (para o conjunto e os pormenores do dispositivo, ver ISO 148-1).



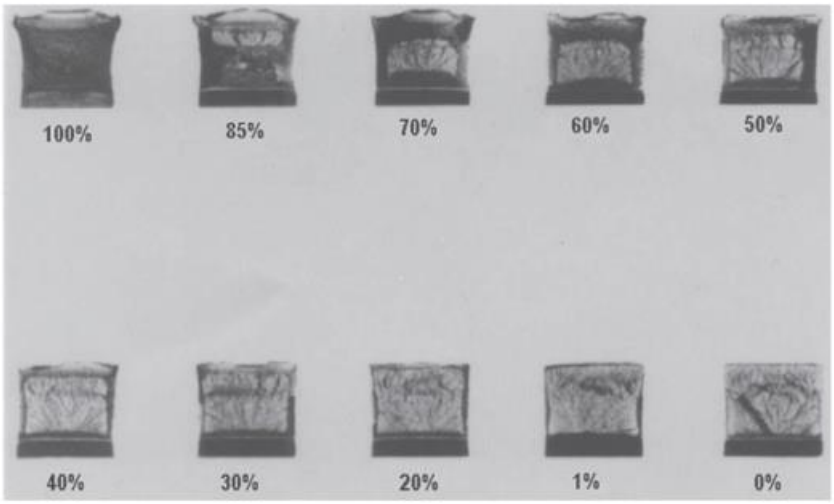
Legenda
1 Entalhe
2 Zona de clivagem (frágil)
3 Zona de Cisalhamento (sem brilho)

NOTA 1 Medir as dimensões médias A e B com uma aproximação de 0,5 mm.
NOTA 2 Determinar a percentagem de fratura por cisalhamento utilizando a Tabela 13.

Figura 57 - Determinação da percentagem de fratura por cisalhamento.

B [mm]	**A** [mm] 1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10
	Percentagem de cisalhamento																		
1,0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1,5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2,0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2,5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3,0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3,5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4,0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4,5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5,0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5,5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6,0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6,5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7,0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7,5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8,0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0
Deve ser comunicado um cisalhamento a 100 % quando A ou B for igual a zero																			

Tabela 13 - Percentagem de cisalhamento para medições em milímetros.



a) Gráficos de aparência de fratura e comparador de percentagem de fratura por cisalhamento



b) Guia para estimar o aspeto da fratura

Figura 58 - Aspeto da fratura.

2.4.7. Relatório de ensaio

Lista das informações obrigatórias que devem constar do relatório de ensaio:

A. referência ao método de ensaio padrão (ISO 148-1);
B. identificação do provete (por exemplo, tipo de aço e número fundido);
C. dimensão do provete, se diferente do provete-padrão;
D. temperatura do ensaio ou temperatura de condicionamento dos provetes;
E. energia absorvida, KV_2, KV_8, KU_2 ou KU_8, conforme adequado;
F. 0 se a amostra ou a maioria das amostras de um grupo de amostras foram partidas (não necessário para os ensaios de aceitação do material);
G. quaisquer anomalias que possam ter afetado o ensaio.

Informações opcionais:

A. orientação da peça de ensaio (ver ISO 3785)
B. energia potencial inicial da máquina de ensaio, em joules;
C. expansão lateral
D. aparência de fratura de cisalhamento;
E. curva energia/temperatura absorvida (ver exemplos);
F. expansão lateral/curva de temperatura;
G. aparência da fratura de cisalhamento/curva de temperatura;

H. a temperatura de transição e os critérios utilizados para a sua determinação;
I. número de provetes que não se partiram completamente no ensaio;
J. Data (mês e ano) das verificações completas diretas e indiretas mais recentes;
K. Incerteza de medição da energia absorvida (ver capítulo sobre incerteza)

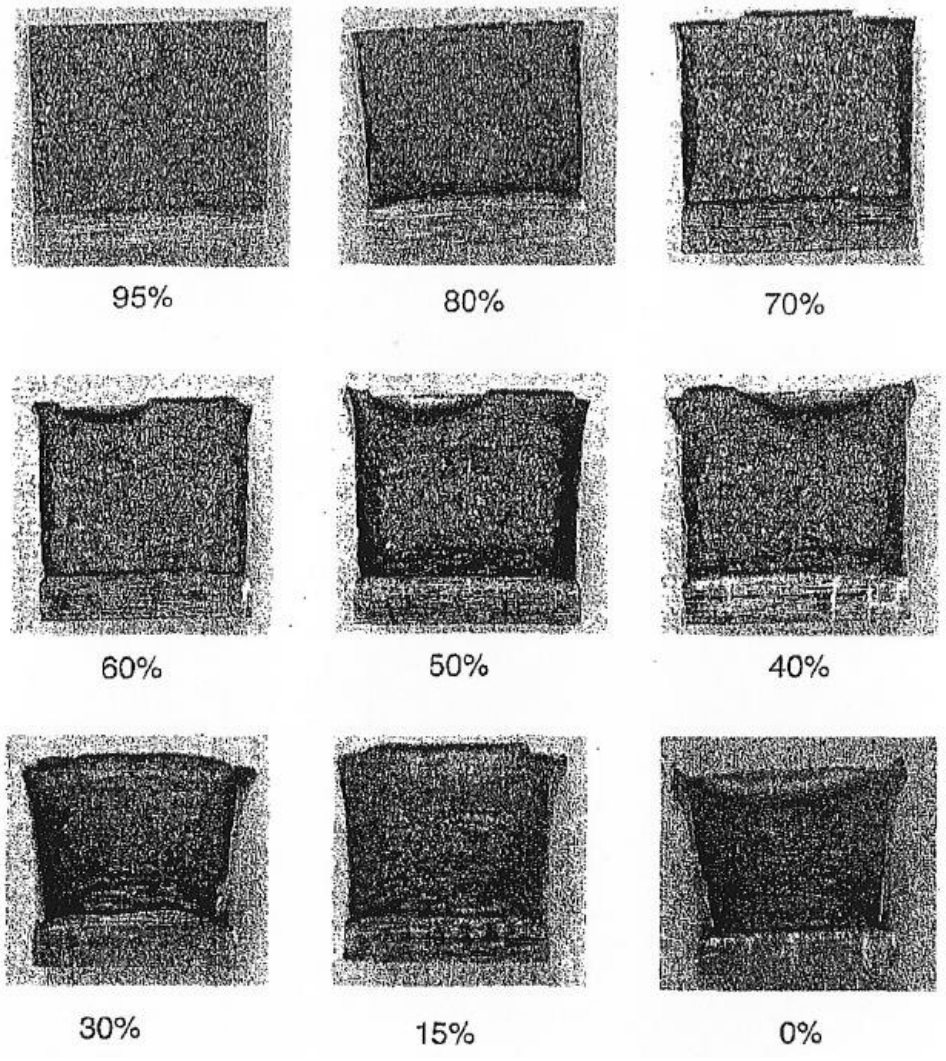


Figura 59 - Aspeto da fratura; percentagem de cristalino (área frágil; imagem retirada de SEP 1670).

2.4.8. Exemplo 1

A curva energia/temperatura absorvida (curva KV/T) mostra a energia absorvida em função da temperatura de ensaio para um determinado tipo de provete, ver Figura 60. Em geral, a curva é obtida desenhando uma curva ajustada através dos valores individuais. A forma da curva e a dispersão dos valores de ensaio dependem do material, da forma da amostra e da velocidade de impacto. No caso

de uma curva com uma zona de transição dúctil-frágil, é feita uma distinção entre a zona de prateleira superior, a zona de transição e a zona de prateleira inferior.

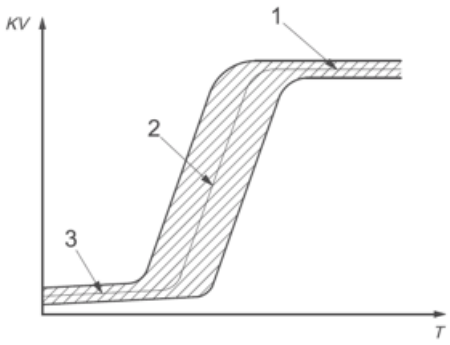
A temperatura de transição, Tt, caracteriza a posição do aumento acentuado na curva energia/temperatura absorvida. Uma vez que o aumento acentuado geralmente se estende por uma faixa de temperatura bastante ampla, não pode haver uma definição geralmente aplicável da temperatura de transição. Os seguintes critérios foram considerados úteis, entre outros, para determinar a temperatura de transição:

A temperatura de transição, T_t, é a temperatura à qual

A. se atinge um determinado valor de energia absorvida, por exemplo, KV_8 = 27 J,
B. se atinge uma determinada percentagem da energia absorvida do valor de prateleira superior, por exemplo, 50 %,
C. ocorre uma porção específica de fratura de cisalhamento, por exemplo, 50 %, e
D. é atingida uma determinada quantidade de expansão lateral, por exemplo, 0,9 mm.

A escolha do método utilizado para definir a temperatura de transição deve ser especificada na norma ou especificação do produto, ou por acordo.

A norma SEP 1670 pode ser dada como exemplo para realizar um ajuste dos pontos de dados experimentais e selecionar a temperatura de teste adequada para obter uma curva de transição. Esta norma considera a % cristalina (área frágil em percentagem) para determinar o FATT50 (temperatura de transição do aspeto da fratura a 50% do cristalino) ou outro FATT na curva de transição (ver Figura 61); A norma SEP 1670 também fornece um plano de ensaio com o número de amostras a ensaiar a cada temperatura (ver Figura 62).



Legenda
T Temperatura
KV Energia absorvida

1 Zona da prateleira superior
2 Zona de transição
3 Zona da prateleira inferior

Figura 60 - Curva energia/temperatura absorvida mostrada esquematicamente.

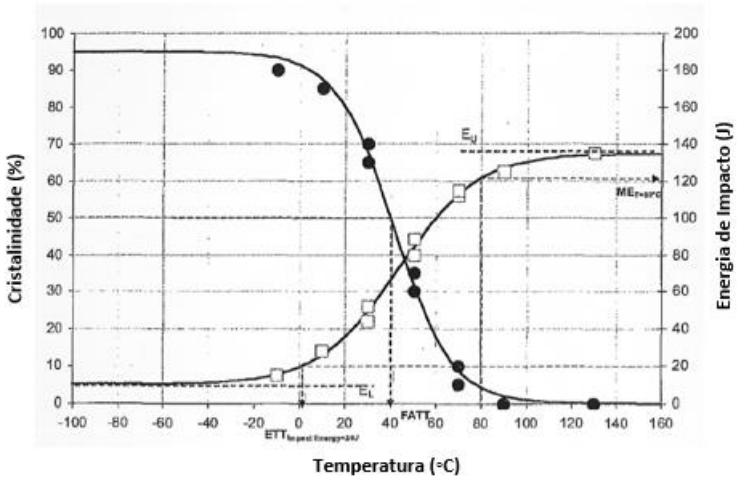


Figura 61 - Gráfico mostrando o princípio para determinar os valores característicos das curvas de compensação (fração de fratura frágil e energia de impacto de entalhe em função da temperatura); note que EU é a energia absorvida na prateleira superior, E_L é a energia absorvida na prateleira inferior e $ME_{T=80°C}$. é a energia de impacto a 80°C, $ETT_{Impact\ Energy=20J}$ é a temperatura a 20 J de energia absorvida e FATT é a temperatura a 50% da cristalinidade.

Temperatura em ◦C	Número de amostras
$T_{inicial}$	1
$T_{inicial}$ – 20 ◦C	2
$T_{inicial}$ – 40 ◦C	1
$T_{inicial}$ – 60 ◦C	1
$T_{inicial}$ + 20 ◦C	2
$T_{inicial}$ + 40 ◦C	1
$T_{inicial}$ + 80 ◦C	1
$T_{livremente\ selecionável}$	1

Figura 62 - SEP 1670 também fornece um plano de teste com o número de amostras a serem testadas a cada temperatura.

2.4.9. Exemplo 2

Provete retirado de uma soldadura de topo a topo com um comprimento de exame de 40 mm e uma espessura de exame de 10 mm.

Sem qualquer exigência sobre entalhe e método de ensaio:

- Denominação de base: BW / (L_f a_f)
- Para este exemplo: BW / [40 · 10)

Com requisitos adicionais (entalhe de face quadrada e método de ensaio):

- Denominação completa: BW / (L_f a_f)/ S_r (ver Figura 55)
- Para este exemplo: BW / [40 · 10) / S_r (Ver Figura 55)

2.5. Ensaios de fratura de juntas soldadas

2.5.1. Prefácio

O Ensaio de Fratura é um método simples para investigar a qualidade de uma junta produzida através de um processo de soldadura por fusão. Ao contrário de um ensaio de tração, não se regista nem a carga máxima para a rutura nem o deslocamento durante o ensaio; O único objetivo do teste é romper a solda para revelar e examinar as falhas ou imperfeições de soldagem presentes na junta.

O objetivo deste método é proporcionar um controlo paralelo ao ensaio volumétrico não destrutivo (por exemplo, ensaio radiográfico e ensaio ultrassónico) quando estes possam ser difíceis de aplicar ou quando seja necessário um novo exame para determinar a qualidade de uma soldadura. Portanto, juntamente com a execução do ensaio de fratura, é realizado um exame visual (de acordo com a ISO 17637) e a quantificação das imperfeições é realizada aplicando as normas ISO 5817 e ISO 10042 e o nível de qualidade da junta é determinado. Depois disso, o nível de qualidade obtido é comparado com os requisitos para verificar a conformidade do resultado.

Neste capítulo são citadas as referências normativas para a realização do ensaio de fratura e o método de ensaio ISO 9017 (ensaio de fratura) é relatado e descrito.

2.5.2. Referências

- ISO 9017 Destructive tests on welds in metallic materials - Fracture test
- ISO 5817 Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding
- excluded) - Quality levels for imperfections
- ISO 10042 Welding - Arc-welded joints in aluminium and its alloys - Quality levels for imperfections
- ISO 17637 Non-destructive testing of welds - Visual testing of fusion-welded joints

2.5.3. Introdução

O objetivo do ensaio de fratura é examinar a superfície de fratura de uma junta soldada (junta soldada por fusão) para identificar e quantificar as imperfeições de acordo com as normas ISO 17637 (exame visual) e ISO 5817 ou ISO 10042 (níveis de qualidade para imperfeições em juntas soldadas por fusão em aço, níquel, titânio e suas ligas ou para alumínio e suas ligas, respetivamente). Portanto, a junta

deve ser sempre rompida em duas partes para revelar as superfícies de fratura a serem examinadas. Um ensaio de fratura em que nenhuma fratura é obtida não é válido.

O método de ensaio descrito na norma ISO 9017 especifica as dimensões dos provetes e os procedimentos para a realização de ensaios de fraturas, a fim de obter informações sobre tipos, tamanhos e distribuição das imperfeições internas, tais como porosidades, fissuras, falta de fusão, falta de penetração e inclusões sólidas na superfície da fratura. O ensaio descrito na norma ISO 9017 é aplicável a materiais metálicos em todas as formas de produto com juntas feitas por qualquer processo de soldadura por fusão com espessura igual ou superior a 2 mm.

O método sugere diferentes técnicas para fraturar a junta através do metal de solda, a fim de examinar a superfície da fratura. O ensaio (fratura da junta) deve ser efetuado à temperatura ambiente (23 ± 5°C); além disso, recomenda-se o uso de entalhes para melhor fraturar os espécimes. Além disso, as dimensões e a temperatura do entalhe podem ser variadas para induzir a fratura. Basicamente, para melhor induzir a fratura, a temperatura de teste pode ser reduzida (por exemplo, para materiais dúcteis) e o tamanho do entalhe pode ser aumentado.

Finalmente, a fratura pode ser induzida por flexão ou tensão, carga estática ou dinâmica.

Na tabela a seguir, a lista de termos adotados na ISO 9017 é relatada juntamente com suas descrições e definições (ver Tabela 14).

Denominação	Definição	Descrição
-	Peça de ensaio	Amostra a examinar no local onde os espécimes são colhidos (ver Figuras 63 a 66)
-	Provete	Parte do provete recolhida para efetuar o ensaio de fratura (ver Figuras 68 a 70)
L_f	Duração do exame	Comprimento do provete medido ao longo do eixo de soldadura entre quaisquer entalhes laterais (medido em [mm])
ΣL_f	Duração total do exame	Soma dos comprimentos de todos os provetes que constituem o provete, medidos ao longo do eixo da soldadura, das faces de fratura entre os entalhes laterais dos provetes (medidos em [mm])
a_f	Espessura de exame	espessura da área de fratura de cada provete (medida em [mm])
A_f	Área de exame	Produto da duração do exame e da espessura do exame para cada provete (medidos em [mm^2])
ΣA_f	Área total de exame	soma de todas as áreas de exame (medidas em [mm^2])
W	Largura original	Largura original do provete (ver Figura 68)
X	Comprimento total	Comprimento total da soldadura no provete

t, t_1, t_2	-	Espessura do provete (medida em [mm]), ver Figuras 69 e 70
l_1, l_2	-	Comprimento do provete (medido em [mm])
D	-	Diâmetro exterior do tubo (medido em [mm])
FW	Solda de ângulo	Solda realizada no canto entre duas placas ou uma placa e um tubo (por exemplo, uma perpendicular à outra); ver Figuras 65 e 66.
BW	Solda de topo a topo	Soldadura realizada entre duas placas de dois tubos para estendê-los ao longo do seu eixo longitudinal (por exemplo, tubos) ou ao longo da sua largura (por exemplo, placas); ver Figuras 63 e 64.
S	Entalhe lateral	Entalhe num lado (ou lados) da solda
F	Entalhe facial	Entalhe longitudinal na face da solda
R	Entalhe de raiz	Entalhe longitudinal na raiz da solda
q	Entalhe quadrado	Ver Figura 67
r	Entalhe redondo	Ver Figura 67
s	Entalhe afiado	Ver Figura 67
S_q	Entalhe lateral	Entalhe lateral (S) Quadrado (q)
S_r	Entalhe lateral	Entalhe lateral (S) Redondo (r)
O_s	Entalhe lateral	Entalhe lateral (S) Afiado (s)
F_q	Entalhe facial	Entalhe facial (F) Quadrado (q)
F_r	Entalhe facial	Entalhe facial (F) Redondo (r)
F_s	Entalhe facial	Entalhe facial (F) afiado (s)
R_q	Entalhe de raiz	Entalhe de raiz (R) Quadrado (q)
R_r	Entalhe de raiz	Entalhe de raiz (R) Redondo (r)
R_s	Entalhe de raiz	Entalhe de raiz (R) Afiado (s)

Tabela 14 - Lista de termos e definições extraídos da ISO 9017.

2.5.4. Provetes de ensaio

As dimensões dos provetes estão definidas nas Figuras 63 a 66 e o provete deve fornecer espécimes suficientes para os ΣL_f e ΣA_f exigidos. Os valores de L_f e A_f e o número de provetes devem ser especificados pela norma de aplicação ou por acordo entre as partes contratantes. As juntas soldadas em placas devem ser cortadas transversalmente à junta soldada em provetes de comprimento de solda aproximadamente igual. O eixo da soldadura deve permanecer no meio do provete para as soldaduras de topo a topo.

Para juntas soldadas em tubos, o provete deve fornecer, pelo menos, dois espécimes. Ao efetuar os ensaios de dobragem, deve ensaiar-se um número igual de provetes com a raiz e a face em tensão. Se o diâmetro do tubo for demasiado pequeno para remover o número necessário de provetes, devem ser soldados provetes adicionais.

Cada provete deve ser marcado de modo a identificar a sua localização exata no produto produzido ou nas juntas de onde foi retirado. Uma vez retirado do provete, cada espécime deve ser marcado.

O método de extração deve ser a escolha para evitar a introdução de efeitos térmicos ou mecânicos prejudiciais. Regra geral, deve ser eliminada uma porção de 25 mm de ambas as extremidades das soldaduras de ensaio, a menos que seja necessária informação sobre as extremidades das soldaduras [por exemplo, imperfeições do arranque/paragem]. Em função dos materiais da junta, deve ser escolhido um método de corte adequado de acordo com as seguintes considerações:

- Os provetes de aço devem ser cortados por corte térmico ou por meios mecânicos;
- Os restantes materiais metálicos só podem ser cortados mecanicamente.

A fratura de soldas em placas ou tubos pode ser assistida por um ou mais dos seguintes elementos:

- remoção do reforço de solda
- entalhe em ambas as bordas da solda (entalhe lateral);
- entalhe no reforço (entalhe longitudinal).

Dependendo da ductilidade do metal de soldadura, podem ser utilizados entalhes quadrados, redondos ou agudos (ver Figuras 67 a 70). Para materiais de elevada ductilidade (por exemplo, alumínio e cobre, podem ser recomendados entalhes agudos).

A profundidade dos entalhes deve ser suficiente para provocar fraturas na soldadura. A profundidade do entalhe deve ser tal que:

- entalhe lateral: $L_f \geq 70\%$ W ou $\Sigma L_f \geq 60\%$ X
- entalhe longitudinal: $a_f \geq 80$ % t ou t_1 ou t_2

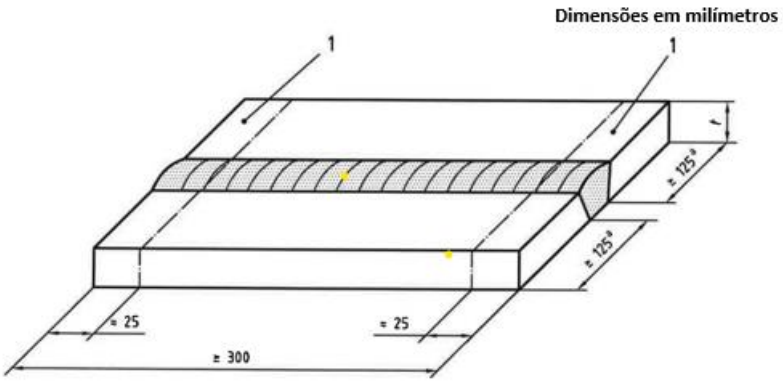


Figura 63 - Peça de ensaio para soldas de topo a topo em placa; Nota: 1 = eliminar; a ≥ 150 mm para materiais de elevada condutividade térmica (por exemplo, alumínio e cobre).

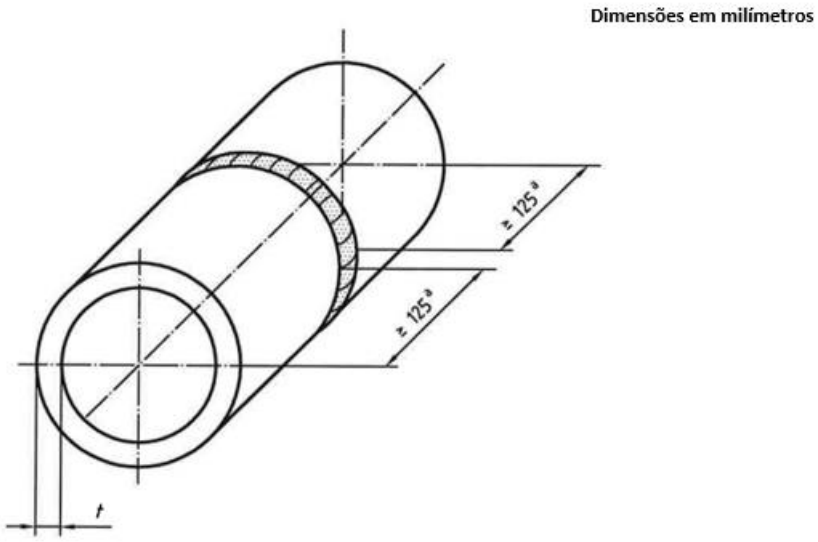


Figura 64 - Peça de ensaio para soldas de topo a topo em tubo; Nota: a ≥ de 150 mm para materiais de elevada condutividade térmica (por exemplo, alumínio e cobre).

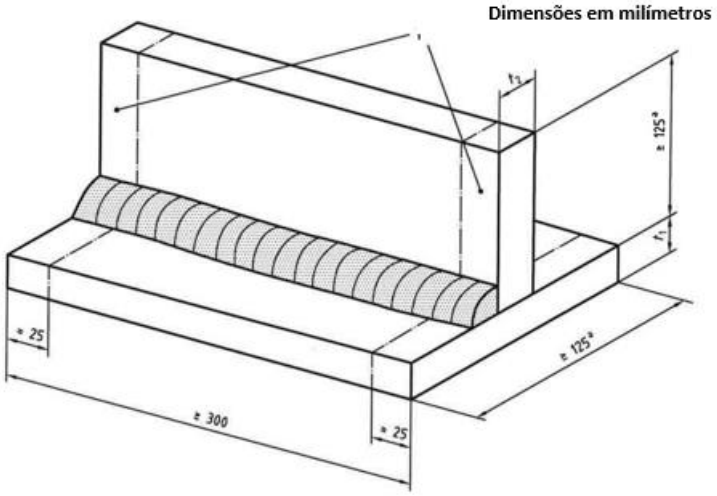


Figura 65 - Provete para soldas de ângulo em chapa; Nota: a ≥ de 150 mm para materiais de elevada condutividade térmica (por exemplo, alumínio e cobre).

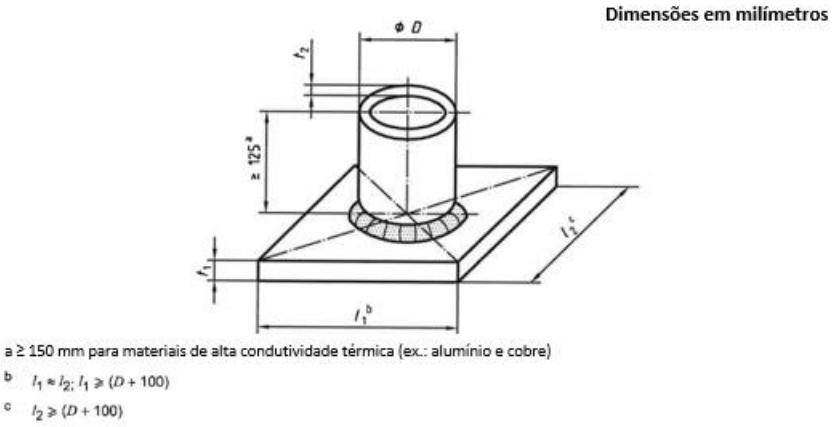


Figura 66 - Provete para soldas de ângulo em tubo.

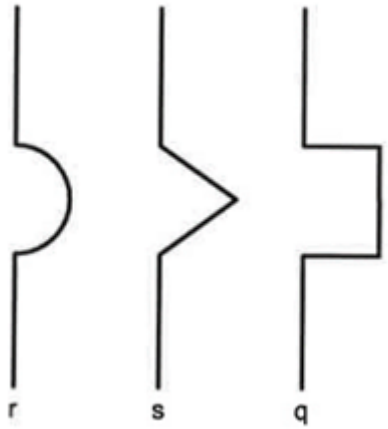


Figura 67 - Perfis de entalhe (r = redondo; s = afiado; q = raiz).

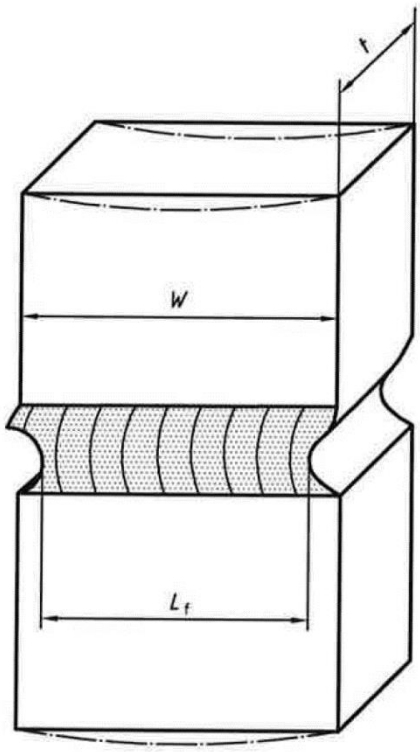


Figura 68 - Entalhes laterais (observe que as linhas completas são para placas, enquanto as linhas pontilhadas/tracejadas são para tubos).

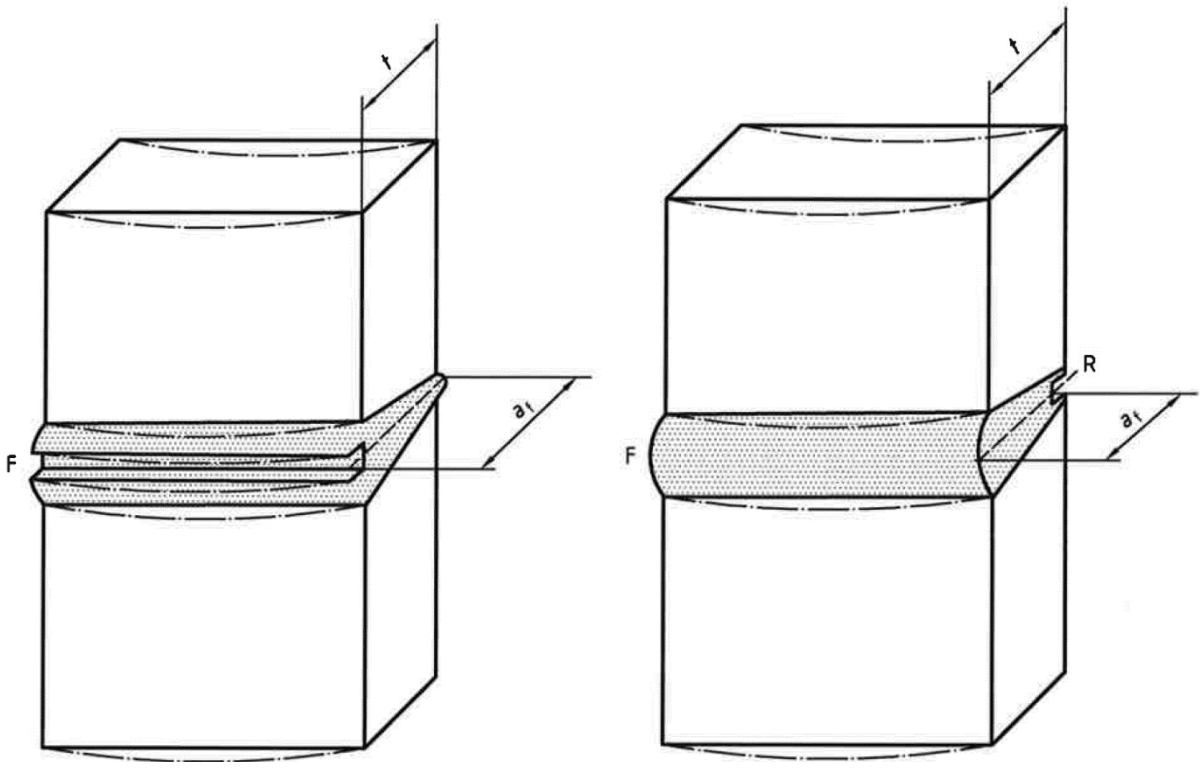


Figura 69 - Entalhes longitudinais em soldas de topo a topo, à esquerda: Entalhes faciais; à direita: Entalhes de r
(note que as linhas completas são para placas, enquanto as linhas pontilhadas/tracejadas são para tubos).

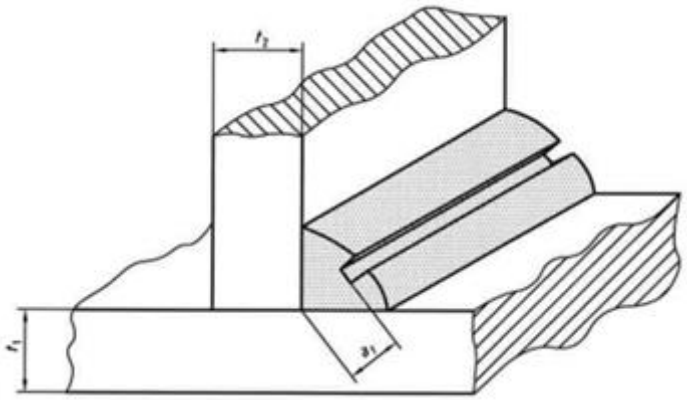


Figura 70 - Entalhes longitudinais em soldas de ângulo.

2.5.5. Procedimento de ensaio

Os ensaios de fratura podem ser realizados por:

- golpes dinâmicos (por exemplo, com um martelo); ver figuras 71 a) a c) para o peso corporal e figura 72 a) para o peso corporal
- aplicação de uma carga pressionando uma prensa de vice, dobradeira ou oficina; ver Figuras 7 1 d) a f) para BW e Figuras 72 c) e c) para FW
- aplicação de uma carga por tensão (por exemplo, com uma máquina de ensaio de tração), ver figura 71 g)

Para materiais dúcteis, pode ser útil ter uma distância mínima (b_{min}) entre o entalhe e as mandíbulas das garras do dispositivo ver Figura 71 c). Além disso, para metais de solda dúcteis, como aços austeníticos, alumínio, níquel de cobre e suas ligas, pode ser necessário restringir a espessura da amostra de teste e a espessura da garganta, aumentar a largura do entalhe, diminuir o raio do entalhe e aumentar a gravidade (carga de curso, carga de martelo) do teste, se for necessária fratura no metal de solda. Para metais de solda dúcteis, como aço ferrítico, pode ser necessário arrefecer a amostra de teste.

Materiais mais espessos podem ser fraturados por golpes de martelo. Quando for utilizada uma máquina de dobragem, o diâmetro da primeira deve ser escolhido de maneira a que a fratura ocorra sem necessidade de dobragem alternada. A flexão pode ser efetuada quer com a soldadura perpendicular quer transversal à direção da força aplicada, de acordo com as Figuras 71 c) a f). O limite mais baixo para o teste de alumínio é de aproximadamente 8 mm de espessura.

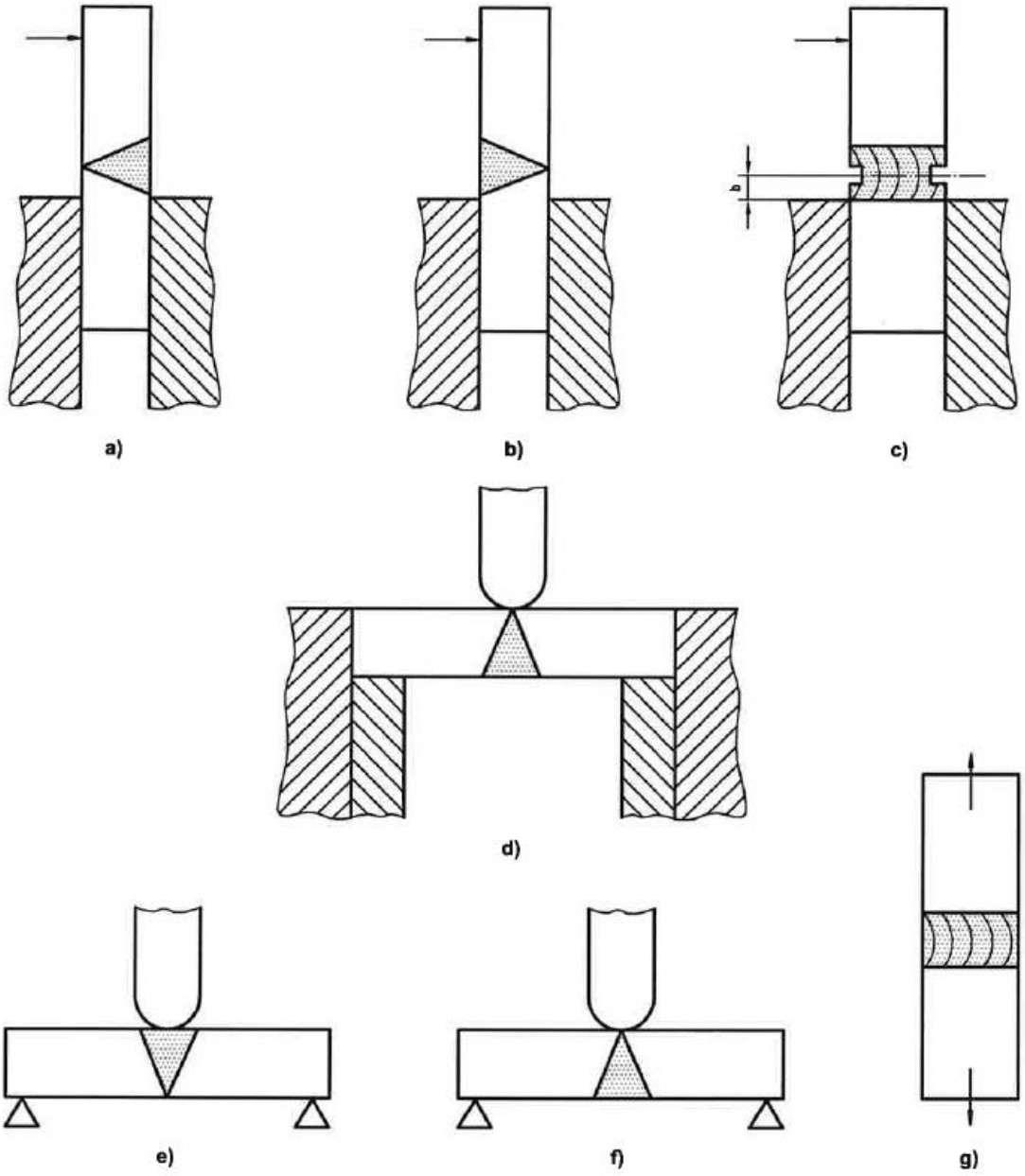


Figura 71 - Exemplos de métodos de ensaio em soldas de topo a topo (Entalhes de acordo com as Figuras 47 a 49).

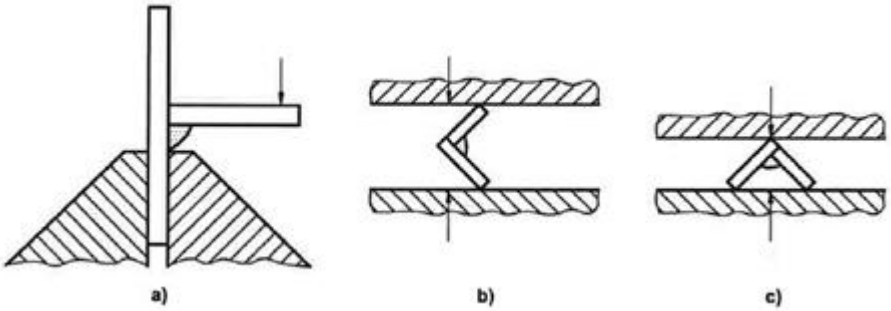


Figura 72 - Exemplos de métodos de ensaio em soldas de ângulo (Entalhes de acordo com as Figuras 47 e 50).

2.5.6. Resultado do ensaio

Após a rutura da amostra, a superfície de fratura deve ser examinada visualmente em conformidade com a norma ISO 17637. Para uma deteção clara e identificação de imperfeições, pode ser utilizada uma lupa de baixa ampliação (por exemplo, com ampliação até cinco vezes).

Deve ser reportada uma descrição completa do aspeto da superfície da fratura e do tipo e localização de qualquer imperfeição presente. Deve indicar-se que a qualidade foi avaliada de acordo com a norma ISO 5817 ou ISO 10042. O nível de qualidade é especificado pela norma de aplicação ou por acordo entre as partes contratantes.

O relatório de ensaio deve conter as seguintes informações:

- uma referência ao método de ensaio normalizado aplicado (ISO 9017);
- a identificação do provete;
- a denominação do espécime de acordo com a Tabela 14;
- registos dos tipos, localizações e dimensões de todas as imperfeições inaceitáveis, de acordo com o nível de qualidade pertinente.

2.5.7. Exemplo 1

Provete retirado de uma soldadura de ângulo com um comprimento de exame de 40 mm e uma espessura de exame de 10 mm.

Sem qualquer exigência sobre entalhe e método de ensaio:

- Denominação de base: FW / (L_f a_f)
- Para este exemplo: FW / [40 · 10)

Com requisitos adicionais (entalhe de face quadrada e método de ensaio):

- Denominação global: FW / L_f a_f)/ F_q (ver Figura 70)
- Para este exemplo: FW / [40 · 10) / F_q (Ver Figura 70)

2.5.8. Exemplo 2

Provete retirado de uma soldadura de topo a topo com um comprimento de exame de 40 mm e uma espessura de exame de 10 mm.

Sem qualquer exigência sobre entalhe e método de ensaio:

- Denominação de base: BW / (L_f a_f)
- Para este exemplo: BW / [40 · 10)

Com requisitos adicionais (entalhe de face quadrada e método de ensaio):

- Denominação global: BW / (L_f a_f)/ S_r (ver Figura 68)
- Para este exemplo: BW / [40 · 10) / S_r (Ver Figura 68)

2.5.9. Exemplo 3

Um exemplo de um relatório de ensaio típico, consulte a Figura 73.

EXEMPLO DE UM RELATÓRIO DE ENSAIO

N.º .....

De acordo com pWPS.....

De acordo com resultado do ensaio "ensaio de fratura"
resultado do ensaio ".....”

Fabricante: .....

Objetivo da examinação: .....

Forma do produto: .....

Material base: .....

Consumíveis: .....

Denominação do provete: .....

Tabela A.1 – Ensaio de fratura de acordo com a ISO 9017

Espécime de Teste	Denominação	Resultados	
		Tipo e dimensão das imperfeições	Nível de Qualidade

Examinador ou organismo examinador: **Aprovado por:**

....

(nome, data e assinatura) **(nome, data e assinatura)**

Figura 73 - Exemplo de um relatório de ensaio de acordo com a norma ISO 9017.

2.5.10. Exemplo 4

Um exemplo das superfícies de fratura de quatro espécimes de solda de topo a topo com entalhes laterais redondos (S_r) e com reforço entalhado (entalhe redondo da face, F_r) após a fratura, ver Figura 74.

Os espécimes à esquerda mostram uma morfologia dúctil da superfície de fratura sem falhas relevantes e sem imperfeições (superfície aceitável), os espécimes à direita (note que duas metades de espécimes diferentes são relatadas) revelaram algumas porosidades e outras imperfeições (destacadas por um retângulo tracejado branco) nas superfícies de fratura (ver Figura 74).

Além disso, na mesma figura, indicam-se o comprimento do exame (L_f) e a espessura do exame ($_{af}$), juntamente com a espessura original ($_t$) e a largura original da amostra (*W*).

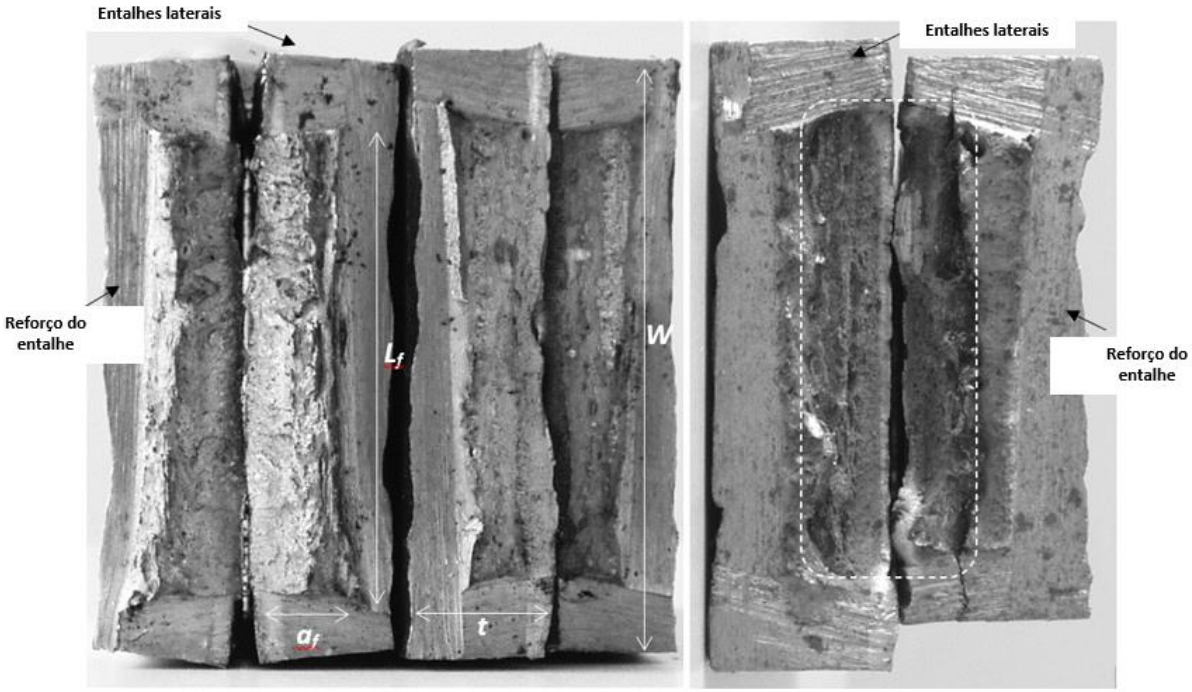


Figura 74 - Superfícies de fratura de espécimes de soldas de topo a topo com Sr e reforço do entalhe (Fr).

2.6. Ensaios de dureza de juntas soldadas

2.6.1. Definição de dureza

A dureza é a propriedade de um material que lhe permite resistir à deformação plástica, geralmente por indentação. É determinado medindo a profundidade permanente da indentação. Dada uma carga fixa e um indentador específico, quanto menor for a indentação, mais duro é o material. No entanto, a dureza também pode ser avaliada pela resistência a arranhões ou cortes por outro material.

A dureza não é uma propriedade material intrínseca ditada por definições precisas em termos de unidades fundamentais de massa, comprimento e tempo. Um valor de propriedade de dureza é o resultado de um procedimento de medição definido.

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^o}{2}}{d^2}$$

$$HV = 1.854 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Em que *F* é a carga aplicada (medida em quilogramas-força), d = Média aritmética das duas diagonais, *d1* e *d2* em mm e d^2 é a área da indentação (medida em milímetros quadrados).

Quando a diagonal média da indentação tiver sido determinada, a dureza de Vickers pode ser calculada a partir da fórmula, mas também podemos usar tabelas de conversão de dureza.

A dureza Vickers, HV, é designada como mostrado no exemplo a seguir.

2.6.2. Método de ensaio de dureza

Normalmente, três tipos de métodos de ensaio são usados para medir a dureza dos metais, sendo eles, ensaio de dureza Brinell, ensaio de dureza Rockwell e ensaio de dureza Vickers. Eles se distinguem uns dos outros pelo uso de diferentes indentadores. Uma esfera de aço endurecido ou metal duro de 10 mm de diâmetro geralmente é usada como o indentador no ensaio de dureza Brinell, um cone de diamante ou aço no ensaio de dureza Rockwell e um indentador de diamante em forma piramidal no ensaio de dureza Vickers.

O valor da dureza depende do procedimento de medição definido. E não pode ser definido em termos de unidades fundamentais de massa, comprimento e tempo. O método mais utilizado é o ensaio de dureza Vickers.

2.6.3. Ensaio de dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers é o método padrão para medir a dureza de metais, particularmente aqueles com superfícies extremamente duras. O indentador utilizado é uma pirâmide de base quadrada cujos lados opostos se encontram no ápice em um ângulo de 136º (Figura 75a). O diamante é pressionado na superfície do material com uma carga. Após um tempo de permanência (10 a 15 segundos), a carga é removida.

As duas diagonais de indentação deixadas na superfície do material após a remoção da carga (Figura 75b) são medidas ao microscópio calibrado devido ao pequeno tamanho da marca (geralmente entre 0,020 mm e 1,400 mm) e a média é calculada.

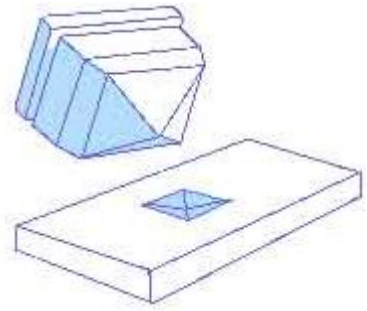


Figura 75a - Ensaio de dureza Vickers

(http://www.hardnesstesters.com/hardness-method-2.htm).

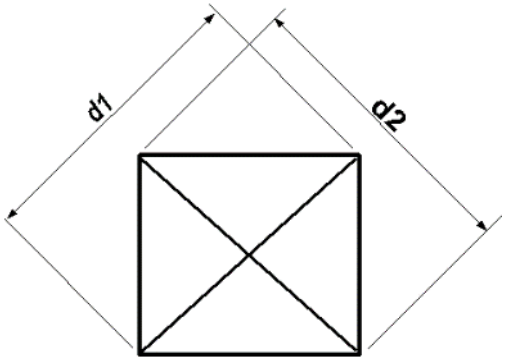


Figura 75B – A marca residual na superfície.

O número de Vickers (HV) é calculado pela seguinte fórmula:

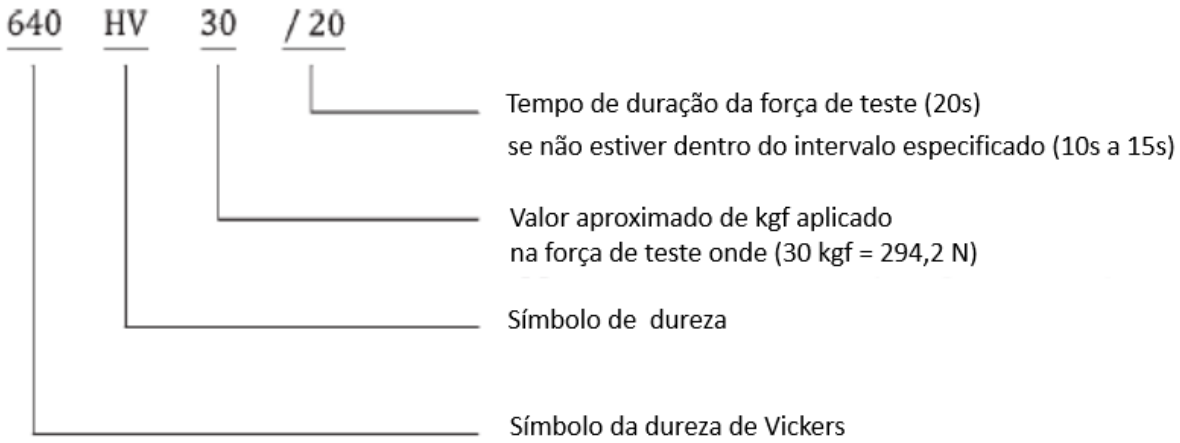
$$HV = \frac{2F \sin\frac{136^o}{2}}{d^2}$$

$$HV = 1.854 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Em que *F* é a carga aplicada (medida em quilogramas-força), d = Média aritmética das duas diagonais, *d1* e *d2* em mm e d^2 é a área da indentação (medida em milímetros quadrados).

Quando a diagonal média da indentação tiver sido determinada, a dureza de Vickers pode ser calculada a partir da fórmula, mas também podemos usar tabelas de conversão de dureza.

A dureza Vickers, HV, é determinada como exemplificado a seguir.



Outras configurações de carga diferentes (1, 2, 5, 10, 30, 50 e 100 kgf) dão números de dureza praticamente idênticos em material homogêneo, o que é muito mais fácil do que na mudança arbitrária de escala, bem como com os outros métodos de ensaio de dureza. As vantagens do ensaio

de dureza Vickers são que leituras extremamente precisas podem ser feitas, e apenas um tipo de indentador é usado para todos os tipos de metais e tratamentos de superfície.

A resolução exigida ao sistema de medição diagonal depende da dimensão da menor indentação a medir e deve estar em conformidade com a Tabela 15. Ao determinar a resolução do sistema de medição, deve ter-se em conta a resolução da ótica do microscópio, a resolução digital da escala de medição e a dimensão gradual de qualquer movimento de palco, quando aplicável.

Comprimento diagonal, *d* mm	**Resolução do sistema de medição**
0,020 ≤ *d* < 0,080	0.000 4 mm
0,080 ≤ *d* ≤ 1,400	0,5 % de *d*

Tabela 15 - Resolução do sistema de medição.

A conversão de dureza entre diferentes métodos e escalas não pode ser calculada de forma matematicamente exata para uma ampla gama de materiais. Diferentes cargas, diferentes formas de indentações, homogeneidade da amostra, propriedades de trabalho a frio e propriedades elásticas complicam o problema. Todos os quadros e gráficos devem ser considerados equivalentes aproximados, em especial aquando da conversão para um método ou escala que não seja fisicamente possível para o material de ensaio específico e, por conseguinte, não possa ser verificado. Um exemplo seria a conversão do valor HV 10 de um revestimento fino para o equivalente HRC.

Os links para as tabelas e gráficos de conversão de dureza estão apresentados de seguida (em inglês):

Tabela de conversão de dureza

Gráfico de conversão de dureza

Gráfico de Equivalentes de resistência à tração de Brinell, Vickers e Ultimate (1)

Gráfico de conversão de dureza relacionada com as Escalas da dureza Rockwell C (materiais duros)

Gráfico Estimativa de Equivalência da dureza Rockwell C e Vickers (matriais duros)

Calculadora conversora de HV, MPa e GPa

Antes de um ensaio de dureza Vickers, a máquina deve ser verificada, para garantir que está corretamente configurada de acordo com as instruções do fabricante.

Em especial, deve verificar-se que:

a) o êmbolo que segura o indentador é capaz de deslizar na sua guia sem qualquer atrito ou folga lateral excessiva;
b) o suporte do indentador está firmemente colocado no êmbolo;
c) a força de ensaio pode ser aplicada e removida sem choques, vibrações ou ultrapassagens e de forma a que as leituras não sejam influenciadas;
d) o sistema de medição diagonal:
    1) se estiver integrado na máquina, a passagem da remoção da força de ensaio para o modo de medição, não influencia as leituras;
    2) o dispositivo de iluminação do microscópio de medição produz iluminação uniforme de todo o campo observado com contraste suficiente entre a indentação e a superfície circundante para determinar claramente o limite;
    3) O centro da indentação está no centro do campo de visão, se necessário.

A verificação direta de uma máquina de ensaio de dureza Vickers envolve:

a) calibração da força de ensaio;
b) verificação do indentador;
c) calibração e verificação do sistema de medição diagonal;
d) verificação do ciclo de ensaios.

A verificação direta deve ser efetuada a uma temperatura de (23 ± 5) °C. Se a verificação for efetuada fora desta gama de temperaturas, tal deve ser indicado no relatório de verificação.

Os instrumentos utilizados para a verificação e calibração devem ser rastreáveis de acordo com as normas nacionais.

Deve medir-se cada força de ensaio utilizada dentro da gama de trabalho da máquina de ensaio. Sempre que a posição de entrada afete a força aplicada, tal deve ser feito em, pelo menos, três posições do êmbolo, uniformemente espaçadas em toda a sua amplitude de movimento durante o ensaio. No caso das máquinas de ensaio cuja força de ensaio não é influenciada pela posição do êmbolo, por exemplo, sistema de carga controlado por circuito fechado, a força de ensaio pode ser calibrada numa posição.

Efetuam-se três leituras para cada força de ensaio, *F*, em cada posição do êmbolo. Imediatamente antes de cada leitura, o indentador deve ser deslocado na mesma direção que durante o ensaio.

A máquina de ensaio deve ser verificada através de blocos de referência calibrados em conformidade com a norma ISO 6507-3. Os blocos devem ter sido calibrados utilizando as mesmas forças de ensaio que a máquina utilizará em ensaios futuros. Ao verificar mais do que uma força de ensaio, selecionam-se pelo menos dois blocos de referência das gamas de dureza a seguir especificadas para cada força de ensaio que a máquina venha a verificar. O conjunto de blocos necessário para verificar a máquina relativamente a todas as forças de ensaio deve ser escolhido de modo a que seja utilizado, para as verificações, pelo menos um bloco de referência de cada gama de dureza. Ao verificar as máquinas de ensaio utilizando apenas uma força de ensaio, devem utilizar-se três blocos de referência, um de cada uma das três gamas de dureza a seguir especificadas.

As gamas de dureza devem ser escolhidas, sempre que possível, de modo a replicar os níveis de dureza mais frequentemente ensaiados quando se utilizam as forças de ensaio específicas.

— <250 HV

— 400 HV a 600 HV

— >700 HV

Em cada bloco de referência, devem ser feitas e medidas cinco indentações. O ensaio deve ser realizado em conformidade com a norma ISO 6507-1. Para os ensaios, só devem ser utilizadas as superfícies calibradas dos blocos de ensaio.

As verificações diretas devem ser efetuadas de acordo com o calendário indicado na Tabela 16. Recomenda-se a realização de verificações diretas a cada 12 meses.

A verificação indireta deve ser realizada pelo menos uma vez de 12 em 12 meses e após a realização de uma verificação direta.

Requisitos de verificação	**Força**	**Sistema de Medição diagonal**	**Ciclo de ensaio**	**Indentador[a]**
Antes de começar a trabalhar pela primeira vez	x	x	x	x
Após desmontagem e remontagem, se a força, o sistema de medição diagonal ou o ciclo de ensaio forem afetados.	x	x	x	
Incumprimento da verificação indireta[b]	x	x	x	
Verificação indireta > a 13 meses	x	x	x	

[a] Além disso, recomenda-se que o indentador seja verificado diretamente após 2 anos de uso.

[b] A verificação direta destes parâmetros pode ser realizada sequencialmente (até que a máquina passe pela verificação indireta) e não é necessária se puder ser demonstrado, por exemplo, por ensaios com um indentador de referência, que o indentador foi a causa da falha.

Tabela 16 - Verificações diretas de máquinas de ensaios de dureza.

A análise da incerteza de medição é uma ferramenta útil para ajudar a determinar fontes de erro e compreender as diferenças entre os valores medidos. O presente anexo fornece orientações sobre a estimativa da incerteza, mas os valores derivados são meramente informativos, salvo instruções específicas em contrário do cliente. Os critérios especificados neste documento para o desempenho da máquina de teste foram desenvolvidos e refinados no decorrer de um período de tempo significativo.

Ao determinar uma tolerância específica que a máquina tem de satisfazer, a incerteza associada à utilização de equipamento de medição e/ou normas de referência foi incorporada nesta tolerância, pelo que não seria adequado considerar esta incerteza, por exemplo, reduzindo a tolerância através da incerteza de medição.

Isso se aplica a todas as medições feitas ao realizar uma verificação direta ou indireta da máquina. Em cada caso, é simplesmente o valor medido resultante da utilização do equipamento de medição especificado e/ou das normas de referência que é utilizado para avaliar se a máquina está ou não em conformidade com este documento. No entanto, pode haver circunstâncias especiais em que a redução da tolerância pela incerteza de medição seja adequada.

2.6.4. Referências (última edição)

- ISO 6507-1: Metallic materials – Vickers hardness test – Part 1: Test method
- ISO 6507-2: Metallic materials – Vickers hardness test – Part 2: Verification and calibration of testing machines
- ISO 6507-3: Metallic materials – Vickers hardness test – Part 3: Calibration of reference blocks
- ISO 6507-4: Metallic materials – Vickers hardness test – Part 4: Tables of hardness values
- ISO 4516: Metallic and other inorganic coatings — Vickers and Knoop microhardness tests
- EN ISO 14271: Resistance welding - Vickers hardness testing (low-force and microhardness) of resistance spot, projection, and seam welds
- ISO 22826: Destructive tests on welds in metallic materials — Hardness testing of narrow joints welded by laser and electron beam (Vickers and Knoop hardness tests)
- EN ISO 4498: Sintered metal materials, excluding hardmetals - Determination of apparent hardness and microhardness
- ISO 18265: Metallic materials – Conversion of Hardness Values
- EN ISO 14577-1: Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 1: Test method
- EN ISO 14577-2: Metallic materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 2: Verification and calibration of testing machines
- EN ISO 15614-1: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure test. Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys

2.7. Exercícios para a sala de aula

Os seguintes exercícios teóricos e práticos deverão ser respondidos pelos formandos após as sessões de formação teórica do **CAPÍTULO 2**, para avaliar o seu progresso nos conhecimentos adquiridos.

2.7.1. Ensaios de Tração de Metais à Temperatura Ambiente

2.7.1.1. Exercício 1

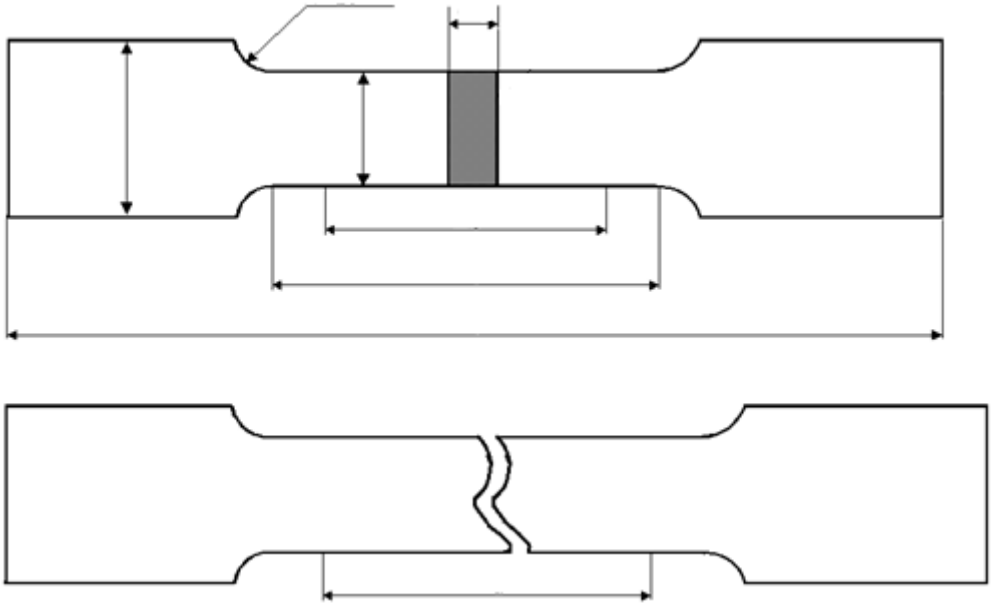
Responda às seguintes perguntas para avaliar a sua compreensão dos conceitos. Forneça respostas breves e concisas.

1. Qual é o objetivo do ensaio de tração?
2. Quais são os principais componentes de uma máquina típica de ensaio de tração?
3. Explique a diferença entre stress de engenharia e v verdadeiro.
4. Defina os termos deformação elástica, deformação plástica e fratura no contexto do ensaio de tração.
5. Qual é a resistência ao rendimento de um material e como é determinada?
6. Qual é a diferença entre a resistência à tração (UTS) e a resistência de rendimento?
7. Descrever o conceito de endurecimento por deformação (endurecimento por trabalho) e o seu efeito nas propriedades de tração de um material.
8. Qual é a importância do alongamento e redução nas medições de área em ensaios de tração?
9. Como é que a temperatura afeta as propriedades mecânicas de um material durante o ensaio de tração?

2.7.1.2. Exercício 2 | Demonstração

Por favor, preencha os símbolos em falta na figura da lista abaixo e explique o significado dos símbolos.

- a_0 –
- b_0 –
- b_1 -
- L_c –
- L_0 –
- L_t –
- L_u –
- R -



2.7.2. Exercícios de ensaios de tração de juntas soldadas com soldas de topo a topo, juntas cruciformes, juntas sobrepostas e juntas de soldas de ângulo

2.7.2.1. Exercício 1

Responda às seguintes questões para avaliar a sua compreensão dos conceitos. Forneça respostas breves e concisas.

1. Descreva os requisitos para a seleção de uma amostra de ensaio a partir de uma junta soldada, incluindo a sua localização e processo de maquinagem.
2. Explicar as dimensões e as condições da superfície a que o provete deve obedecer.
3. Discuta as situações em que podem ser necessárias várias amostras de ensaio para cobrir a espessura total de uma junta e as considerações de espessura relacionadas.
4. Explicar o processo de aplicação da carga e os critérios de fratura para a amostra de ensaio durante o ensaio de tração.
5. Descrever a importância de examinar as superfícies fraturadas da amostra e registar quaisquer imperfeições que possam ter influenciado os resultados do ensaio.
6. Enumerar as informações que devem ser incluídas no relatório de ensaio.

2.7.2.2. Exercício 2 | Demonstração

Indicar qual o método de falha do espécime no ensaio de tração de junta transversal que está correto.

2.7.3. Exercícios de Ensaios de dobragem de Metais de Juntas Soldadas

2.7.3.1. Exercício 1

Defina como irá agir em caso de falha da amostra durante o ensaio de dobragem, escolha uma das seguintes opções e explique a sua resposta:

A. Descarta o espécime e pede um novo para a oficina
B. liga para o cliente para informar que a soldagem não é aceitável
C. mede a profundidade da fissura e calcula a secção efetiva para obter, assim, a tensão de dobragem real nos espécimes fissurados
D. após a medida da falha na superfície de tensão, você deteta que seu comprimento é inferior a 3 mm, portanto, você dobra ainda mais a amostra para aumentar esse comprimento até um valor maior que 3 mm, confirmando assim o resultado inaceitável (falha da amostra)
E. você mede apenas o ângulo em que a rutura da amostra ocorreu (no caso da amostra foi rutura, portanto, não foi possível continuar o ensaio)
F. você mede o alongamento em que ocorreu a rutura da amostra (no caso da amostra foi rutura, portanto, não foi possível continuar o ensaio)
G. Se você avaliar que a amostra falhou, você colocará no relatório de ensaio o ângulo máximo alcançado pela amostra durante o ensaio de dobragem e colocará nas notas o comprimento da rutura ou falha detetada
H. Se, durante o ensaio de dobragem, você observar a comparação de uma falha, você interrompe imediatamente o ensaio, para medir o comprimento da falha e estabelecer se ela é aceitável ou não
I. Se, durante o ensaio de dobragem, você observar a comparação de uma falha, você continuará o teste até o final, mas a uma velocidade menor do que o início
J. Se, durante o ensaio de dobragem, observar a comparação de uma falha, continuará o ensaio até ao final e, em seguida, não realizará os ensaios nos restantes espécimes da mesma amostra, porque não é necessário
K. Se vir a comparação de um defeito na superfície de tensão da amostra durante o ensaio, interromperá imediatamente o ensaio, repetindo-o assim na mesma amostra, mas dobrando-o de forma inversa, pelo que a face oposta onde a falha é comparada é agora a face de tensão

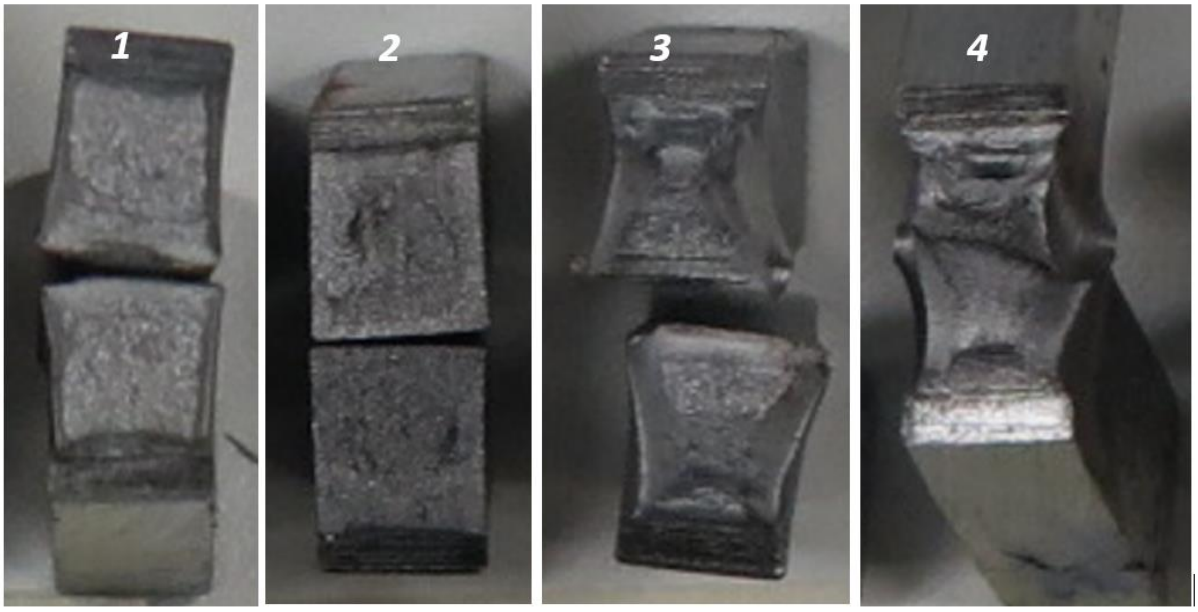
2.7.3.2. Exercício 2 | Demonstração

A. Calcule o alongamento no espécime recebido; considerar uma largura inicial da solda de 15 mm
B. medir o tamanho da amostra recebida e definir se ela está em conformidade com a ISO 5173 e pode ser testada de acordo com o mesmo método de ensaio padrão
C. medir o ângulo em que o espécime recebido foi dobrado

2.7.4. Exercícios de Ensaio de Impacto Charpy de Metais de Juntas Soldadas

2.7.4.1. Exercício 1

Reorganize as imagens a seguir dos espécimes de entalhe C de harpia C testados a uma temperatura mais baixa até aquela testada na temperatura mais alta, liste os números de referência na ordem correta. Do que ordenar os espécimes do que com maior expansão lateral para aquele com a menor.



Finalmente, tente estimar a amplitude da área de cisalhamento da fratura de cada espécime com um erro de 5% (por exemplo, espécime X relacionado a uma área de cisalhamento na faixa de 10/20%).

2.7.4.2. Exercício 2 | Demonstração

A. medir a expansão lateral do espécime partido que você recebeu
B. verificar a dimensão da amostra recebida e confirmar se as tolerâncias da ISO 148-1 são cumpridas

2.7.5. Exercícios de Ensaios de Fratura de Juntas Soldadas

2.7.5.1. Exercício 1

Descreva onde você colocaria o entalhe nesses tipos de amostra:

- Solda de topo a topo em aço carbono, 20 mm de espessura
- Solda de topo a topo em aço inoxidável, 25 mm de espessura

e defina se o arrefecimento da amostra antes da rutura é sugerido para limitar as deformações plásticas, portanto, selecione uma das seguintes opções e explique sua resposta:

- O arrefecimento é sugerido em ambas as amostras (aço carbono e aço inoxidável)
- O arrefecimento é sugerido apenas em aço carbono
- O arrefecimento é sugerido apenas em aço inoxidável

2.7.5.2. Exercício 2 | Demonstração

A. identificar e medir as imperfeições dos espécimes recebidos
B. identificar o tipo de entalhe e calcular a área de exame na amostra recebida

2.7.6. Exercícios de Ensaios de Dureza de Juntas Soldadas

2.7.6.1. Exercício 1

Quais são os passos anteriores à medição da dureza Vickers de um material?

1. Coloque a amostra na plataforma.
2. Mova a amostra para a posição.
3. Desloque-se para focar.
4. Selecione o método de ensaio e carregue.
5. Escolha um objetivo e um nome de tarefa.
6. Use a câmera de visão geral para posicionar o indentador.
7. Inicie o teste do indentador.

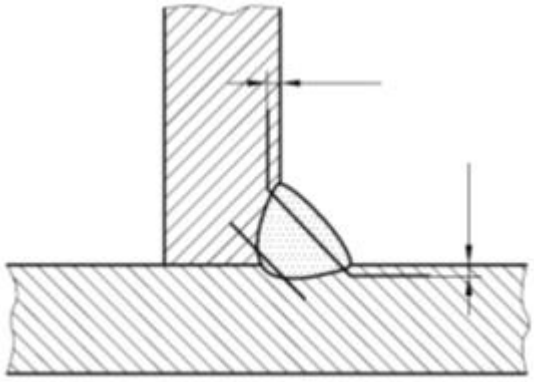
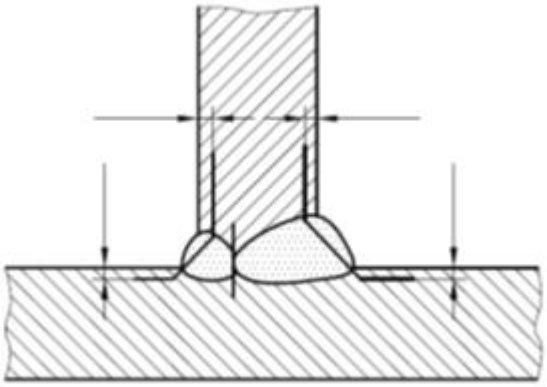
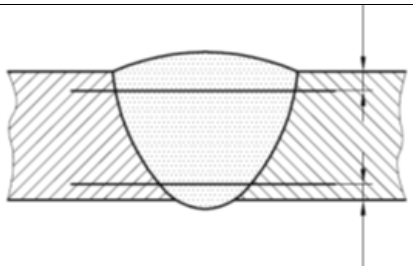
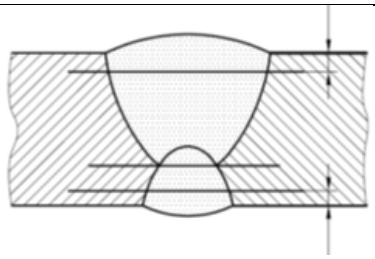
2.7.6.2. Exercício 2

Quais são as condições de superfície necessárias para o ensaio de dureza Vickers?

A condição de superfície necessária para o ensaio de dureza Vickers depende da carga utilizada. Para o ensaio de dureza macro, as cargas aplicadas devem ser superiores a 1 kgf (HV1) e a superfície deve ser moída. Geralmente é aplicada uma carga HV10.

2.7.6.3. Exercício 3 | Demonstração

Para a qualificação de um procedimento de soldadura (todas as posições de soldadura), por favor marque a distância e o número de indentações em que a dureza da amostra deve ser medida:

	
Soldadura de ângulo	**Soldadura de topo a topo T**
	
Soldadura de topo a topo de apenas um lado, tanto em única passagem como em múltiplas passagens.	**Soldadura de topo a topo de ambos os lados, tanto em única passagem como em múltiplas passagens.**

3. Incerteza de medição

3.1. Métodos gerais de cálculo das incertezas

Nenhuma medida é exata. Quando um valor é medido, o resultado depende do sistema de medição, do procedimento de medição, da habilidade do operador, do ambiente e de outros efeitos.

Mesmo que a quantidade deva ser medida várias vezes, da mesma forma e nas mesmas circunstâncias, obtém-se, em geral, um valor medido diferente de cada vez, partindo do princípio de que o sistema de medição tem resolução suficiente para distinguir entre os valores.

A dispersão dos valores medidos estaria relacionada com a forma como a medição é realizada. A sua média forneceria uma estimativa do valor real da quantidade que, em geral, seria mais fiável do que um valor medido individualmente. A dispersão e o número de valores medidos forneceriam informações relativas ao valor médio como uma estimativa do valor real. No entanto, esta informação não seria, em geral, adequada.

Em metrologia, **a incerteza** de medição é a expressão da dispersão estatística dos valores atribuídos a uma quantidade medida. Todas as medições estão sujeitas a incerteza e um resultado de medição só é completo quando é acompanhado por uma declaração da incerteza associada, como o desvio padrão. Por acordo internacional, esta incerteza tem uma base probabilística e reflete um conhecimento incompleto do valor quantitativo.

A incerteza da medição é frequentemente tomada como o desvio padrão de uma distribuição de probabilidade de estado de conhecimento sobre os valores possíveis que podem ser atribuídos a uma quantidade medida. Incerteza relativa é a incerteza de medição relativa à magnitude de uma determinada escolha única para o valor da quantidade medida, quando esta escolha é diferente de zero. Esta escolha individual em particular é geralmente chamada de valor medido, que pode ser ótimo em algum sentido bem definido (por exemplo, um valor médio). Assim, a incerteza relativa de medição é a incerteza de medição dividida pelo valor absoluto do valor medido, quando o valor medido não é zero.

Esta incerteza deve ser comunicada como um valor explícito ± ou como uma incerteza implícita utilizando o número adequado de valores significativos.

A incerteza de medição é:

- um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão de valores verdadeiros que poderiam razoavelmente ser atribuídos à mensurada [1].
- a dúvida que existe em relação ao resultado de qualquer medição [2].

- a expressão da dispersão estatística dos valores atribuídos a uma quantidade medida [3].
- uma avaliação completa da incerteza deve ser feita de acordo com o JCGM 100:2008 [2]
- independentemente do tipo de fontes, para a dureza, existem duas possibilidades para a determinação da incerteza.
- uma possibilidade baseia-se na avaliação de todas as fontes relevantes que aparecem durante uma calibração direta. Como referência, está disponível uma orientação Euramet [3];
- a outra possibilidade baseia-se na calibração indireta utilizando um bloco de referência de dureza (CRM - material de referência certificado) [3, 4].

3.1.1. Erro versus incerteza

É importante não confundir os termos "erro" e "incerteza".

Erro é a diferença entre o valor medido e o "valor verdadeiro" do objeto medido.

A incerteza é uma quantificação da dúvida sobre o resultado da medição.

Sempre que possível, são feitas tentativas para corresponder a quaisquer erros conhecidos: por exemplo, aplicando correções de certificados de calibração. Mas qualquer erro cujo valor não é conhecido é uma fonte de incerteza.

3.1.2. A incerteza e os tipos de incerteza

A abordagem do Guia ISO para cálculos de UM (Uncertainty Measurement):

- Especificações do medidor:
  - incluindo a equação completa
- Quantificação de incertezas significativas em todos os parâmetros:
  - A: a partir das estatísticas da experiência repetida;
  - B: por qualquer outro meio (teoria, certificados, julgamento...).
- Expresso como desvio-padrão;
- Combinando de acordo com os princípios estabelecidos.

3.1.2.1. Desvio-padrão

É a raiz quadrada da Variante V = S ^{2}

$$S^2 = \frac{\Sigma\,(x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

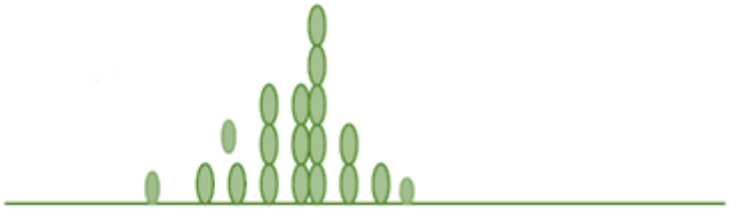


Figura 76 - Histograma de desvio-padrão.

3.1.2.2. A incerteza padrão

É a incerteza do resultado de uma medição expressa em desvio-padrão. A incerteza-padrão é definida como um desvio-padrão.

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Todas as incertezas que contribuem devem ser expressas no mesmo nível de confiança, convertendo-as em incertezas padrão. Uma incerteza padrão é uma margem cujo tamanho pode ser considerado "mais ou menos um desvio-padrão". A incerteza padrão nos diz sobre a incerteza de uma média (não apenas a dispersão de valores). Uma incerteza padrão é geralmente indicada pelo símbolo u ou u(y) (a incerteza padrão em y).

3.1.2.3. Avaliação de incerteza de tipo a

É a incerteza avaliada através da análise estatística da série de observações.

A partir dos resultados repetidos: Distribuição uniforme = Distribuição normal e incerteza padrão.

Distribuição normal: É usada ao fazer uma estimativa a partir de observações repetidas de um processo que varia aleatoriamente.

Uma incerteza é então dada como um desvio-padrão.

Desvio-padrão da média (s/x média): Desvio-padrão relativo (RSD) ou coeficiente de variação %.

Uma incerteza para uma variável com um intervalo de confiança de 95% (ou outro) é dada como:

- u(x) = k/2 (para 95% de probabilidade);

- u(x)= k/3 (para 99,7% de probabilidade).

Distribuição normal: Num conjunto de leituras, por vezes é mais provável que os valores se aproximem da média do que se afastem. Isto é típico de uma distribuição normal (Gaussiana). Este tipo de distribuição distingue-se se o conjunto de indivíduos for calculado a partir de um grande grupo de pessoas. A maioria das pessoas está perto da altura média; poucos são extremamente altos ou baixos.

A Figura 77 mostra um conjunto de 10 valores "aleatórios" numa distribuição aproximadamente normal.

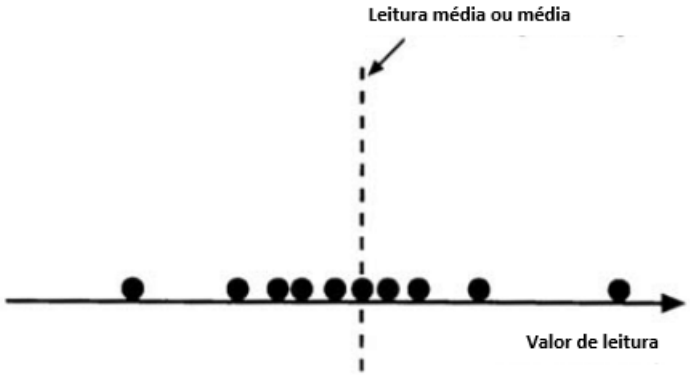


Figura 77 – "Gráfico de Blob" de um conjunto de valores que se encontram numa distribuição normal.

A Figura 78 mostra o esquema de uma distribuição normal.

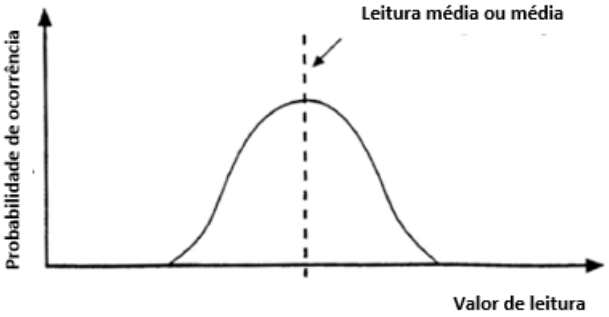


Figura 78 - Esquema de uma distribuição "normal".

Quando um conjunto de múltiplas leituras repetidas tiver sido feito (para uma estimativa de incerteza do Tipo A), a média, *x* e o desvio-padrão estimado, *s*, podem ser calculados para o conjunto. A partir destes, a incerteza-padrão estimada, *u*, da média é calculada a partir de:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Em que:

- *n* – o número de medições no conjunto. (A incerteza padrão da média também tem sido chamada de desvio-padrão da média ou erro padrão da média.)

3.1.2.4. Avaliação da incerteza de tipo B

A incerteza é avaliada por outros meios que não a análise estatística da série de observações. De certificados e literatura:

- Retangular: Divisor: $\sqrt{3}$
- Triangular: Divisor: $\sqrt{6}$

Quando a informação é mais escassa (em algumas estimativas do tipo B), apenas os limites superior e inferior da incerteza podem ser estimados. Pode então ser necessário estimar que o valor é igualmente suscetível de tomar qualquer lugar no meio, ou seja, uma distribuição retangular ou uniforme. A incerteza-padrão para uma **distribuição retangular** é calculada da seguinte forma:

$$\frac{a}{\sqrt{3}}$$

Em que:

- *A* - Meia amplitude (ou meia largura) entre os limites superior e inferior.

Distribuições retangulares ocorrem com bastante frequência, mas também pode haver ocasiões em que o uso da fórmula de cálculo é necessário.

A distribuição retangular é utilizada quando a informação é retirada de um certificado ou especificação, que dá a incerteza associada sem especificar o nível de confiança.

Exemplo: A pureza do cádmio é citada como:

= 99,99 ± 0,1%.

Estes são casos de distribuição retangular (uniforme). Neste método, as distribuições são tais que a probabilidade de unidades individuais (pureza) está mais próxima dos extremos. Portanto, uma estimativa é feita aplicando a distribuição retangular. Então:

Incerteza padrão assumida = meia largura / Sq. $\sqrt{3}$

3.1.2.5. Incerteza combinada

As incertezas dos componentes são combinadas para produzir uma incerteza global.

As incertezas-padrão individuais calculadas por avaliações de Tipo A ou Tipo B podem ser validamente combinadas por "soma de quadrados" (também conhecida como "soma de quadrados de raiz"). O resultado é chamado de incerteza padrão combinada, denotada por u_c ou $u_c(y)$.

A soma de quadratura é mais simples quando o resultado de uma medição é obtido por adição ou subtração. Casos mais complicados também são abordados abaixo para multiplicar e dividir medições, bem como outras funções.

- As incertezas dos componentes são combinadas para produzir uma incerteza global;
- Algumas das incertezas podem anular-se mutuamente;
- Alguns podem ser interdependentes;
- Fatores de incerteza de tipo A e tipo B;
- Ao combinar todos os fatores, eles devem ser convertidos em uma unidade de medida semelhante (por exemplo, %; gm; ml; °C; menos uma unidade).

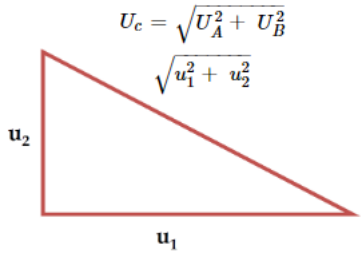


Figura 79 - Combinação de incertezas.

3.1.2.6. Incerteza prolongada

Em alguns casos, a incerteza-padrão combinada deve ser multiplicada pelo fator de cobertura adequado.

$$U_E = k \cdot U_c$$

Em que:

- k – normalmente 1,96 ou 2,00 para um nível de confiança de 95%.

3.2. Incerteza de medição para ensaio de tração, ensaio de impacto e ensaio de dureza

As incertezas de medição podem vir do instrumento de medição, do item medido, do ambiente, do operador e de outras fontes. Tais incertezas podem ser estimadas usando a análise estatística de um conjunto de medições e usando outros tipos de informações sobre o processo de medição. Existem regras estabelecidas para calcular uma estimativa global da incerteza a partir destas informações individuais. A utilização de boas práticas - como a calibração rastreável, o cálculo cuidadoso, a manutenção de registos e a verificação - pode reduzir as incertezas de medição.

Quando a incerteza numa medição é avaliada e declarada, a adequação à finalidade da medição pode ser avaliada em conformidade.

Precisão da precisão: A relação entre exatidão e precisão pode ser ilustrada pelo exemplo familiar de disparar de uma espingarda num alvo onde os pontos pretos abaixo representam os golpes no alvo.



Figura 80 - Precisão de precisão.

Uma boa precisão não significa necessariamente uma boa exatidão. No entanto, se um instrumento estiver bem calibrado, a precisão ou reprodutibilidade do resultado é uma boa medida da sua exatidão.

Como há sempre uma margem de dúvida sobre qualquer medição, devemos perguntar: "Qual é o tamanho da margem?" e "Qual é a gravidade da dúvida?". Assim, são realmente necessários dois números para quantificar uma incerteza. Um deles é a largura ou espaçamento da margem. O outro é um nível de confiança e afirma o quão certos estamos de que o "verdadeiro valor" está dentro desse intervalo.

Exemplo:

Poderíamos dizer que o comprimento de um determinado bastão mede 20 cm mais/menos 1 cm, no nível de confiança de 95%. Este resultado pode ser escrito:

20 cm ±1 cm, com um nível de confiança de 95%

A declaração diz que temos 95% de certeza de que o bastão tem entre 19 e 21 cm de comprimento.

3.2.1. Determinação da incerteza em diferentes áreas

É uma boa prática em qualquer medição avaliar e comunicar a incerteza associada aos resultados dos ensaios. Uma declaração de incerteza pode ser solicitada por um cliente que deseje conhecer os limites dentro dos quais se pode presumir que o resultado comunicado se encontra, ou o próprio laboratório de ensaio pode desejar desenvolver uma melhor compreensão de quais os aspetos específicos do procedimento de ensaio que têm maior efeito nos resultados, para que este possa ser controlado mais de perto.

A determinação da incerteza de medição pode ser feita para:

- ensaios mecânicos em materiais metálicos, determinação de incertezas durante ensaios de impacto (martelo Charpy);
- ensaios mecânicos em materiais metálicos, medições de dureza;
- ensaios mecânicos em materiais metálicos, ensaios de incerteza de tração;
- atividades de avaliação da conformidade;

3.2.1.1. Incerteza no ensaio de tração

Em qualquer medição de tração devemos declarar clara e inequivocamente a mensurando, ou seja, o valor final de interesse. Muitas vezes, esta informação relativa ao mensurando é adquirida a partir da leitura de um único instrumento de medição.

Tal medição é considerada como sendo uma medição direta. No entanto, o significado metrológico da palavra "medição" é mais amplo. A palavra "medição" também se refere a quantidades cujos valores são indiretamente estimados com base nos valores, que podem, ou não, ter sido diretamente medidos.

A fim de estimar os valores dos mensurandos, sujeitos a uma medição indireta, deve ser estabelecido um modelo de medição adequado. O modelo deve fornecer uma imagem realista dos elementos envolvidos na medição. O modelo deve ser documentado, geralmente em termos de uma ou mais fórmulas matemáticas ou pode assumir a forma de um algoritmo.

Exemplo. O módulo de elasticidade (*E)* de uma chapa metálica é geralmente determinado de acordo com a seguinte fórmula:

$$E = \sigma/\varepsilon$$

em que:

- σ - significa stress e ε para tensão (ε = (L− Lo)/Lo, onde Lo é a distância original entre as marcas e L é a distância final entre as marcas).

Uma amostra preparada é colocada numa máquina de ensaio de tração. A máquina aplicará uma carga *L* que é medida diretamente com um transdutor, como uma célula de carga. Ao mesmo tempo, a distância entre duas marcas na amostra esticada é medida diretamente com um extensómetro.

O valor de stress será então:

$$\sigma = F/A,$$

em que
F - força aplicada
A - secção transversal do espécime.

A área é avaliada de acordo com o modelo $A = ae$,
em que:
a - largura do espécime
e - espessura (Figura 81).

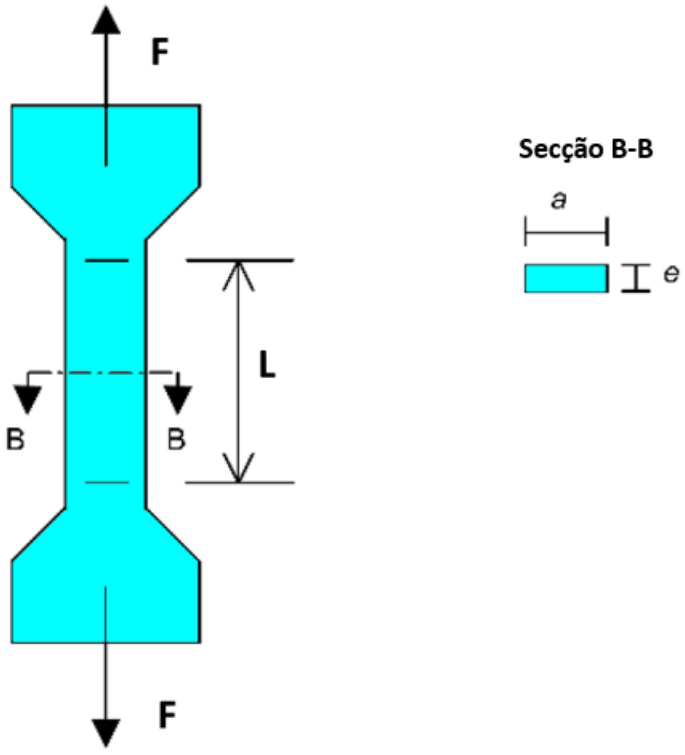


Figura 81 - Exatidão de precisão.

Assim, neste exemplo, a tarefa de avaliação foi dividida em submodelos, para os quais as grandezas sujeitas a medição direta são *F*, L, *a* e *e*, enquanto *A*, *σ* e *ε* são quantidades intermédias. Existe também a possibilidade de combinarmos estes submodelos num único modelo cujas quantidades de entrada são apenas as diretamente medidas.

Em geral, o modelo de medição utilizado deve ser considerado como uma caixa negra, que recebe valores *de entrada* e produz *valores de saída*. Os valores de entrada primários não precisam ser aqueles medidos diretamente pelo medidor (valores que foram determinados em uma ocasião diferente) ou por outros observadores. As quantidades de saída não são necessariamente as quantias de interesse, porque podem funcionar como quantidades de entrada no caso de outro modelo. Por exemplo, o valor do módulo de elasticidade *E*, de uma chapa metálica, pode ser necessário para calcular a deformação de um feixe sob uma carga específica, e pode não haver necessidade de medir *E* se o seu valor puder ser estimado a partir de dados da literatura. Referimo-nos a uma quantidade cujo valor não é estimado como parte da tarefa de avaliação atual como uma quantidade importada. Mesmo o modelo mais simples ficará incompleto se não forem tidas em consideração as correções às indicações dos instrumentos utilizados nas medições diretas.

Cada quantidade X medida diretamente deve ser modelada como X = A + B, onde A é o valor associado às indicações aferidas do instrumento e B é uma quantidade que consiste em uma ou mais grandezas de correção.

Alternativamente, pode-se escrever X = A x C, onde C é um fator de correção.

Por exemplo, se as quantidades de entrada *a* e *e no* modelo *A* = *a* x e, foram medidas com um instrumento comum, como um paquímetro, a correção das suas indicações induz uma correlação entre *a* e *e*. Mesmo que o valor desta correção seja considerado como zero, a sua incerteza terá influência na situação associada à estimativa de *A*. Uma complicação adicional de tal modelo, a ser usado, é devido ao fato de que alguns valores podem não aparecer explicitamente no modelo, embora modifiquem o valor de incerteza.

A fim de obter resultados de ensaio com uma incerteza de medição reduzida, recomenda-se que a área da secção transversal original seja determinada com uma precisão igual ou superior a ±1 %. Para materiais finos, podem ser necessárias técnicas especiais de medição.

Existem dois métodos de teste de velocidades disponíveis. O primeiro, o método A, baseia-se nas taxas de deformação (incluindo a taxa de separação da cabeça cruzada), enquanto o segundo, o método B, se baseia nas taxas de tensão.

Nota: O conhecimento sobre uma quantidade pode ser inferido a partir de medições repetidas (chamada estimativa do tipo A) ou do julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade da quantidade (chamada estimativa do tipo B).

O método A destina-se a minimizar a variação das taxas de ensaio durante o momento em que são determinados os parâmetros sensíveis à taxa de deformação e a minimizar a incerteza de medição dos resultados dos ensaios.

Por conseguinte, e tendo em conta que, muitas vezes, a sensibilidade à taxa de deformação dos materiais não é conhecida, recomenda-se vivamente a utilização do método A.

Se as atividades de ensaio e calibração forem realizadas fora dos limites de temperatura de 10 °C e 35 °C, a temperatura deve ser registada e comunicada. Se estiverem presentes gradientes de temperatura significativos durante o ensaio e/ou a calibração, a incerteza de medição pode aumentar e, fora da tolerância, podem ocorrer condições.

A análise da incerteza de medição é útil para identificar as principais fontes de inconsistências dos resultados medidos.

As normas de produtos e as bases de dados de propriedades de materiais baseadas e/ou relacionadas com a ISO 6892 têm uma contribuição inerente da incerteza de medição. Por conseguinte, não é adequado aplicar novos ajustamentos para ter em conta a incerteza de medição e, por conseguinte, correr o risco de o produto falhar, que está conforme. Por este motivo, as estimativas de incerteza resultantes da aplicação deste procedimento são meramente informativas.

Nota: As condições de ensaio e os limites definidos no presente documento não devem ser ajustados para ter em conta as incertezas de medição e as incertezas de medição estimadas não devem ser combinadas com os resultados medidos para avaliar a conformidade com as especificações do produto.

Embora a ISO 6892-1 exija a geração de uma linha reta com um dado deslocamento paralelo à região linear da curva tensão-deformação, a fim de determinar a resistência de prova especificada, Rp, do material a ser testado, a maioria dos usuários geralmente assume que a inclinação da região elástica linear da curva tensão-deformação corresponde ao módulo de elasticidade do material a ser ensaiado,

uma vez que o módulo de elasticidade, *E*, é dado pela relação *E* = stress/tensão. No entanto, em geral, o extensómetro de classe 1 exigido para o ensaio de tração não é suficientemente preciso para medir as deformações muito pequenas na região elástica com precisão suficiente para obter valores de módulo com um nível aceitável de incerteza.

Para considerar a incerteza, ver os anexos K e L da norma ISO 6892, que fornecem orientações para a determinação da incerteza relacionada com parâmetros metrológicos e valores obtidos a partir dos ensaios interlaboratoriais num grupo de aços e ligas de alumínio.

A estimativa da incerteza de medição para um determinado módulo de elasticidade pode ser feita de acordo com CWA 15261-2:2005, A.5 ou de acordo com o Anexo K da ISO 6892.

Nota: A estimativa da incerteza de medição de acordo com a CWA 15261–2 baseia-se em valores absolutos. Isto resulta em estimativas diferentes dos respetivos orçamentos de incerteza únicos, se, por exemplo, as dimensões da peça de ensaio ou o comprimento do extensómetro diferirem. A estimativa da incerteza de medição de acordo com o Anexo K da ISO 6892 baseia-se em estimativas relativas. Por conseguinte, as estimativas relativas normalmente não se alteram.

A exceção é o orçamento relativo da incerteza de medição para a medição da deformação. Devido às pequenas extensões durante o ensaio na parte elástica, a incerteza absoluta da medição da deformação é relevante para a contribuição da incerteza (de acordo com a norma ISO 9513).

Em CWA 15261–2, o símbolo L_o é usado para o comprimento do medidor e m_E para a inclinação da parte elástica da curva de extensão de força. Para evitar confusão (diferente da CWA), o símbolo L_e é usado para o comprimento do extensómetro e S_E para a inclinação da parte elástica da curva força-extensão. A incerteza de medição de acordo com a CWA 15261-2 é dada pela fórmula abaixo.

$$u_c(E) = \sqrt{\left(\frac{L_e}{S_o}\right)^2 \cdot u^2(S_E) + \left(\frac{S_E}{S_o}\right)^2 \cdot u^2(L_e) + \left(-\frac{S_E L_e}{S_o^2}\right)^2 \cdot u^2(S_o)}$$

Em que:
L_e - comprimento do calibre extensómetro;
S_o - área de secção transversal original;
S_E - inclinação da curva força-extensão;
$u(S_E)$ - incerteza de inclinação da curva força-extensão;
$u(L_e)$ - incerteza do comprimento do extensómetro;

$u(S_o)$ - incerteza da área da secção transversal original.

Nota: Em caso de reprodução dos ensaios, os valores de reprodutibilidade utilizados nas Tabelas 17 a 19 são intervalos de meia largura em conformidade com o Guia ISO/IEC 98-3 [7] e devem ser interpretados como o valor das tolerâncias de dispersão para mais e para menos [±].

A incerteza padrão; u, do valor de um parâmetro pode ser estimado de duas maneiras.

a) Tipo A – Por medição repetida

$$\boldsymbol{u = \frac{s}{\sqrt{n}}}$$

Em que:
s – desvio-padrão das medições;
n – número de observações calculado em média para comunicar o resultado da medição em circunstâncias normais.

b) Tipo B – De outra fonte, por exemplo, certificados de calibração ou tolerâncias

O valor real é igualmente provável de ocorrer em qualquer lugar dentro do intervalo definido, de modo que a distribuição é descrita como retangular ou uniforme. Aqui, a incerteza padrão é dada pela fórmula abaixo.

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

em que:
a - metade da largura do intervalo em que se presume que a quantidade se encontra;

Muitas vezes a estimativa de um valor; *y* envolve a medição de outros valores. A estimativa da incerteza em *y* deve ter em conta os contributos das incertezas de todas estas medições. É, portanto, conhecida como uma incerteza combinada. Se a estimativa envolver simplesmente a adição ou subtração de uma série de medições, $x_1, x_2 \ldots x_n$, então a incerteza combinada em *y* $u(y)$, é dada pela fórmula abaixo.

$$u(y) = \sqrt{(u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + \cdots + u(x_n)^2)}$$

em que:

$u(x\,1)$ - incerteza no parâmetro x_1, etc.

Efeito dos parâmetros do equipamento na incerteza dos resultados dos ensaios

A incerteza dos resultados determinados a partir de um ensaio de tração contém componentes devido ao equipamento utilizado. Vários resultados de testes têm diferentes contribuições de incerteza dependendo da forma como são determinados. A Tabela 17 indica as contribuições de incerteza do equipamento que devem ser consideradas para algumas das propriedades mais comuns do material determinadas num ensaio de tração. Alguns dos resultados do ensaio podem ser determinados com uma incerteza mais baixa do que outros, por exemplo, a resistência superior ao rendimento, R_{eH}, depende apenas das incertezas de medição da força e da área da secção transversal, enquanto a resistência à prova, R_p, depende da força, extensão, comprimento do manómetro, área da secção transversal e outros parâmetros. Para a redução da área, Z, as incertezas de medição da área da secção transversal antes e depois da fratura precisam de ser consideradas.

Parâmetro	**Resultados do Ensaio**					
	R_{eH}	R_{eL}	R_m	R_p	A	Z
Força	X	X	X	X	-	-
Extensão	-	-	-	X	X	-
Comprimento do calibre	-	-	-	X	X	-
S_o	X	X	X	X	-	X
S_u	-	-	-	-	-	X
X : Relevante - : Não relevante						

Tabela 17 - Incertezas que contribuem para os resultados dos ensaios, devido aos dispositivos de medição.

A incerteza dos resultados dos ensaios enumerados na Tabela 17 pode ser determinada a partir dos certificados de calibração dos dispositivos utilizados para a determinação dos resultados dos ensaios. A incerteza pode ser significativamente maior ou menor, e o certificado do equipamento deve ser consultado. Também devem ser consideradas as contribuições da incerteza devidas a fatores como a dispersão do equipamento desde a sua calibração e a sua utilização em diferentes condições ambientais.

Parâmetros em função do material e/ou do procedimento de ensaio

A precisão dos resultados de um ensaio de tração depende de fatores relacionados com o material a ensaiar, a máquina de ensaio, o procedimento de ensaio e os métodos utilizados para calcular as propriedades especificadas do material. Idealmente, todos os seguintes fatores devem ser considerados:

a. temperatura de ensaio;

b. taxas de ensaio;
c. a geometria e a maquinagem do provete;
d. o método de fixação do provete e a axialidade da aplicação da força;
e. as características da máquina de ensaio (rigidez, modo de transmissão e de comando);
f. erros humanos e de software associados à determinação das propriedades de tração;
g. geometria de montagem do extensómetro.

A influência desses fatores depende do comportamento específico do material e não pode ser dada como um valor definido. Se a influência for conhecida, pode ser tida em conta no cálculo da incerteza. Pode ser possível incluir outras fontes de incerteza na estimativa da incerteza de medição expandida. Isso pode ser feito usando a seguinte abordagem.

a. O utilizador tem de identificar todas as fontes adicionais possíveis, que podem ter um efeito, direta ou indiretamente, no parâmetro de ensaio a determinar.
b. As contribuições relativas podem variar de acordo com o material testado e as condições especiais do ensaio.

Cada laboratório é incentivado a preparar uma lista de possíveis fontes de incerteza e a avaliar a sua influência no resultado. Se foi determinada uma influência significativa, esta incerteza, u_p tem de ser incluída no cálculo. A incerteza u_p é a incerteza da fonte *i* sobre o valor a determinar em percentagem, tal como indicado na Fórmula 10. Para u_i, a função de distribuição do parâmetro específico (normal, retangular, etc.) tem de ser identificada. De seguida, é necessário determinar a influência do resultado no nível de um sigma. Esta é a incerteza padrão.

Os ensaios interlaboratoriais podem ser utilizados para determinar a incerteza global dos resultados em condições próximas das utilizadas nos laboratórios industriais, mas não separam os efeitos relacionados com a falta de uniformidade do material dos efeitos atribuíveis ao método de ensaio.

Deve apreciar-se que, à medida que forem disponibilizados materiais de referência certificados adequados, estes serão uma ferramenta útil de estimar a incerteza de medição em qualquer máquina de ensaio, incluindo a influência das garras, flexão, etc., que atualmente são difíceis de quantificar.

Em alternativa, recomenda-se a realização de testes internos regulares para efeitos de controlo de qualidade em materiais com um baixo nível de dispersão nas propriedades (materiais de referência não certificados) [18].

Existem alguns exemplos para os quais é muito difícil fornecer valores de incerteza precisos sem materiais de referência. Quando valores de incerteza fiáveis são importantes, em alguns casos, recomenda-se a utilização de um material de referência certificado ou não certificado para confirmar a incerteza das medições.
O procedimento a seguir detalha as etapas para a estimativa da incerteza relacionada à incerteza nos ensaios de tração.

A avaliação da incerteza associada aos resultados do ensaio (ou da calibração) baseia-se nos seguintes conceitos básicos:

- O conhecimento sobre qualquer quantidade que influencie o resultado de uma medição é, em princípio, incompleto e pode ser expresso por uma função de probabilidade de densidade (FPD) dos valores prováveis da quantidade.
- A média da probabilidade de densidade é considerada a melhor estimativa do valor da quantidade. O desvio-padrão da probabilidade de densidade é tomado como a incerteza-padrão na determinação do valor da quantidade.
- conhecimento sobre uma quantidade (estimativa do tipo A ou B).

A incerteza na medição de uma dimensão de uma amostra de ensaio de tração influenciará a medição da resistência à tração porque as dimensões são necessárias para calcular a tensão. Isto é conhecido como propagação da incerteza, que é novamente um conceito central para a estimativa da incerteza.

É necessário determinar e utilizar um modelo para a propagação de incertezas para calcular a incerteza combinada de parâmetros como a resistência à tração. Em testes mecânicos, aplica-se principalmente modelos linearizados, e uma derivação raiz quadrada da soma pode ser aplicada para calcular a incerteza associada a um mensurando (quantidade de saída) a partir das incertezas de várias medições influentes (quantidades de entrada), cada uma devidamente ponderada por coeficientes de sensibilidade.

Pode dizer-se que o procedimento de estimativa da incerteza, com especial referência aos ensaios mecânicos, consiste nas seguintes etapas:

1. Identificação dos parâmetros para os quais a incerteza deve ser estimada;
2. Identificação de todas as fontes de incerteza no ensaio;
3. Classificação da incerteza nos tipos A e B;
4. Estimativa da incerteza-padrão para cada fonte de incerteza;
5. Cálculo da incerteza combinada para os parâmetros identificados em 1.;
6. Cálculo da incerteza prolongada;
7. Comunicação dos resultados.

O ensaio de tração é um dos testes mecânicos mais comuns realizados para quantificar as propriedades de rigidez, resistência e ductilidade dos materiais.

Essencialmente, o ensaio de tração consiste em carregar, a uma taxa constante de deslocamento ou deformação, uma amostra, fornecendo um comprimento (medidor) de material de secção transversal uniforme, até à rutura. A força (mais comumente chamada de carga) experimentada pela amostra e a extensão do comprimento do dispositivo são monitoradas durante o teste para calcular as várias propriedades características do material. Normalmente, os espécimes têm uma seção transversal retangular ou circular na região do calibre. A tensão de engenharia sentida pelo material na região do medidor em qualquer momento durante o ensaio é obtida dividindo a força exercida sobre a amostra pela área da secção transversal inicial do medidor. A tensão técnica adequada é dada pela relação entre a extensão e o dispositivo e o comprimento inicial do dispositivo.

Passo 1. Identificar os parâmetros para os quais a incerteza deve ser estimada.
Quase sempre em ensaios mecânicos, as medições (quantidades de saída) que caracterizam as propriedades do material não podem ser obtidas diretamente, mas devem ser calculadas a partir de medições (quantidades de entrada) obtidas a partir das amostras e das efetuadas durante o ensaio.

Passo 2. Identificar todas as fontes de incerteza no ensaio.
Para o ensaio de tração, as principais fontes de incerteza devem ser classificadas. As categorias estabelecidas podem mudar com o material testado e as condições de ensaio.

Passo 3. Classificação da incerteza de acordo com o tipo A ou B.
Para os ensaios mecânicos, as fontes de incerteza são, na sua maioria, do tipo B, uma vez que podem ser quantificadas a partir de dados já disponíveis.

Algumas das fontes de incerteza podem estar diretamente relacionadas com as medições primárias realizadas durante um ensaio mecânico, afetando diretamente a qualidade das medições. No entanto, outros fatores também podem afetar a sua qualidade. Outros fatores, como a rugosidade da superfície, o tamanho da amostra e a temperatura ambiente, têm uma fraca influência no $s_{0,2\%}$.

Passo 4. Estimar a incerteza padrão para cada fonte de incerteza.

A incerteza-padrão está relacionada com o desvio-padrão do valor associado à medição.

Se a incerteza é do tipo A, ou seja, um número de medições da quantidade onde foi feita para obter a FPD, e o desvio-padrão da distribuição foi calculado como *s*, então a incerteza é dada por *u=st(P,f)*, onde *t(P,f)* é um fator obtido a partir da Distribuição de Estudantes para o nível de confiança *P* (tipicamente 68,27%) e (n-1) graus de liberdade, sendo *n* o número de medidas tomadas.

Se a incerteza for do tipo B, pode presumir-se uma distribuição retangular. Por exemplo, se a exatidão de um dispositivo de medição de dimensão é conhecida por ser x e uma dimensão de *y é medida,* então o valor real da dimensão pode estar em qualquer lugar na faixa *y±x*. A incerteza, neste caso, é dada por *u=x*.

Passo 5. Cálculo da incerteza combinada u_c

Este é geralmente o elemento mais difícil no processo de estimar as incertezas dos resultados dos testes mecânicos. Baseia-se na relação causa-efeito que liga o resultado das medições ao mensurando.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} [c_i \cdot u(x_i)]^2}$$

em que:
x_i - o coeficiente de sensibilidade associado a x_i.

Tal modelo pressupõe que as fontes individuais de incerteza não estão correlacionadas.
O coeficiente de sensibilidade *c* pode ser obtido a partir da relação funcional do mensurando com as medidas, onde quer que tais relações existam.

Dependendo da temperatura de ensaio de resistência à tração, é imperativo desenvolver relações empíricas a longo prazo, embora estas possam ser limitadas a apenas uma classe de material ou a uma gama de temperaturas definida.

A aplicação da equação de incerteza combinada é melhor compreendida utilizando-a para o caso específico do ensaio de tração. Para um provete de secção retangular, a área inicial é indicada, em termos de largura e largura, por:

$$A_0 = a_0 \cdot b_0$$

Os coeficientes de sensibilidade associados a a_o e b_o são dados por:

$$c_{a0} = b_0 \text{ e ainda} c_{b0} = a_0$$

e a incerteza em A_o pode ser expressa por u_{A0}=

em que:

u_{a0} e u_{b0} - as incertezas individuais na medição de a_o e b_o .

Uma vez que uma derivação da incerteza combinada das várias medições num ensaio de tração pode ser bastante complexa, a forma final de algumas das quantidades de saída mais comumente exigidas é resumida na Tabela da norma.

Em relação à derivação das incertezas combinadas, se não existir um modelo matemático para o ensaio, os laboratórios podem enumerar as quantidades e os parâmetros que podem ter uma influência relevante na incerteza e tentar estimar a sua contribuição para a incerteza global.

Passo 6. Cálculo da incerteza expandida *U.*

A incerteza expandida, *Uc*, é definida como "o intervalo sobre o resultado de uma medição que se pode esperar que abranja uma grande parte da distribuição de valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos ao mensurando". Obtém-se multiplicando a incerteza combinada, u_c , por um fator de cobertura, *k*, que é selecionado com base no nível de confiança exigido.

Para uma distribuição de probabilidade normal, o fator de cobertura mais comumente usado é 2, que corresponde a um intervalo de confiança de 95,4% (na verdade, 95% para fins mais práticos). A incerteza expandida, *U*, é, portanto, mais ampla do que a incerteza combinada, u_c.

Passo 7. Comunicar os resultados.

Uma vez estimada a incerteza expandida, os resultados devem ser comunicados do seguinte modo:

$$V = y \pm U$$

em que:

V - valor estimado do mensurando,

y - resultado médio do ensaio (ou medição),

U - incerteza expandida associada a *y*.

A incerteza expandida registada baseia-se numa incerteza-padrão multiplicada por um fator de cobertura, *k = 2*, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de cobertura, *p*, de aproximadamente 95 %.

3.2.1.2. Incerteza no ensaio Charpy

A norma ISO 148-1 especifica no anexo um método para determinar a incerteza, u (KV), associada à energia média absorvida, KV, de um conjunto de amostras de um material de ensaio. Podem ser desenvolvidos outros métodos de avaliação de u (KV), se cumprirem os requisitos da GUM.

Esta abordagem requer informações da "verificação indireta" da máquina de ensaio de impacto do pêndulo Charpy, que é um método normativo de avaliação do desempenho do instrumento com provetes de referência (ver ISO 148-2).

Nota: A série da norma ISO 148 exige que as máquinas de ensaio de impacto do pêndulo Charpy atendam com sucesso aos requisitos de verificação direta e indireta. Esta última consiste na verificação de todos os requisitos geométricos e mecânicos individuais impostos à construção do instrumento (ver ISO 148-2).

Os papéis da verificação direta e indireta na cadeia de rastreabilidade metrológica das medições de Charpy são apresentados na Figura 82. A cadeia começa a nível internacional com a definição do mensurando, *KV*, ou energia absorvida, nos procedimentos padrão descritos na série da ISO 148.

Os laboratórios de calibração utilizam as peças de ensaio de referência certificadas para verificar a sua máquina de referência e podem utilizar o seu pêndulo para caracterizar e produzir peças de ensaio de referência. Ao nível do utilizador, os laboratórios de ensaio Charpy podem verificar o seu pêndulo com peças de ensaio de referência para obter valores fiáveis de *KV*.

Nota: Os utilizadores podem optar por adquirir provetes de referência certificados de organizações nacionais ou internacionais, contornando o nível do laboratório de calibração.

A análise da incerteza de medição é útil para identificar as principais fontes de inconsistências nos resultados medidos.

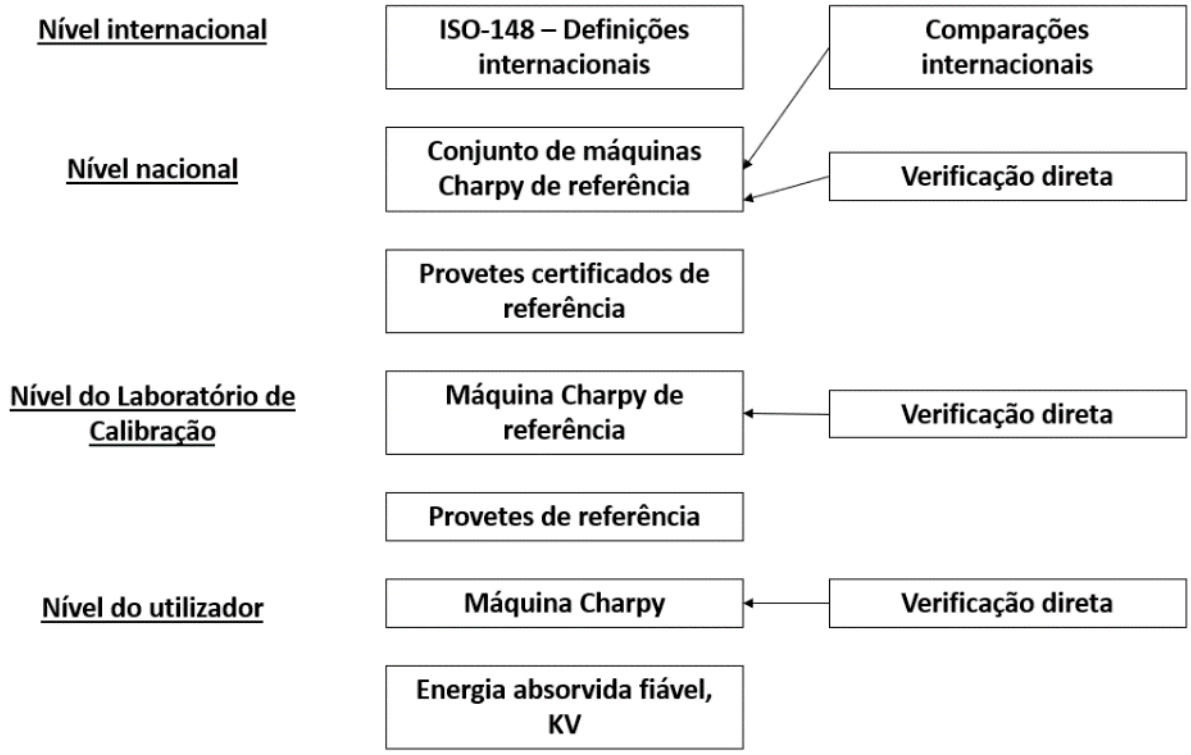


Figura 82 - Estrutura da cadeia de rastreabilidade metrológica para a definição e disseminação das escalas de energia absorvida do ensaio de impacto Charpy.

As normas de produtos e as bases de dados de propriedades de materiais baseadas nesta parte da ISO 148 têm uma contribuição inerente da incerteza de medição. Por conseguinte, não é adequado aplicar novos ajustamentos para ter em conta a incerteza de medição, correndo assim o risco de um produto não estar conforme. Por esta razão, as estimativas de incerteza derivadas de seguir este procedimento são meramente informativas, salvo instruções específicas em contrário do cliente.

As condições de ensaio e os limites definidos nesta parte da norma ISO 148 não devem ser ajustados para ter em conta incertezas de medição, salvo instruções específicas em contrário do cliente. As incertezas de medição estimadas não devem ser combinadas com resultados medidos para avaliar a conformidade com as especificações do produto, salvo instruções específicas em contrário do cliente. Em vez disso, as tolerâncias indicadas devem ser interpretadas como intervalos de aceitação. Esta abordagem pressupõe que as medições são feitas com uma incerteza de medição máxima implicitamente aceite. Sempre que possível, esta incerteza máxima de medição foi especificada na versão atual da série ISO 148. As incertezas de medição dos valores medidos devem ser inferiores aos valores indicados.

Fatores que contribuem para a incerteza

Os principais fatores que contribuem para a incerteza estão associados a:

a. desvio da máquina deduzida na verificação indireta,

b. homogeneidade do material de ensaio e repetibilidade da máquina;

c. temperatura de ensaio.

A equação de medição para a energia média absorvida *KV* é a fórmula abaixo.

$$\overline{KV} = \bar{x} - B_V - T_x$$

Em que:

x – energia absorvida média observada de n espécimes;

B_v – desvio do instrumento baseado na verificação indireta;

T_x – desvio devido à temperatura.

Regra geral [18], os valores medidos devem ser corrigidos em função de distorções conhecidas. A verificação indireta é uma forma de estabelecer o valor do desvio. O desvio da máquina determinado pela verificação indireta é definido na norma ISO 148-2, conforme indicado na fórmula abaixo.

$$B_V = \overline{KV_V} - KV_R$$

Em que:

KV_V – valor médio dos provetes de referência partidos durante a verificação indireta;

KV_R - valor certificado dos provetes de referência;

Dependendo de quão bem o valor de B_V é conhecido, diferentes ações são propostas na ISO 148-2, que lida com a incerteza associada aos resultados da verificação indireta.

a. *By* é bem conhecido e estável. Neste caso excecional, o valor observado *x* é corrigido por um termo igual a *By* para obter *KV.*

b. Na maioria das vezes, não há evidências seguras sobre a estabilidade do valor de B_V. Neste caso, o desvio não é corrigido, mas contribui para u_V, a incerteza do resultado da verificação indireta.

Em ambos os casos, uma incerteza; u_V, associada ao resultado da verificação indireta e ao desvio da máquina, é calculado de acordo com os procedimentos descritos na norma ISO 148-2. O resultado da análise de incerteza da verificação indireta é o valor u_V.

Se houver uma diferença significativa entre os valores de KV_V e KV, então os valores B_V e U_V devem ser multiplicados pela razão KV/KV_V.

Repetibilidade da máquina e heterogeneidade do material

A incerteza de *x*, a média da energia absorvida observada de *n* provetes, é determinada utilizando a fórmula abaixo.

$$u(\bar{x}) = \frac{s_x}{\sqrt{n}}$$

em que:

s_x - desvio-padrão dos valores obtidos nas amostras de ensaio *n*.

O valor s_x é causado por dois fatores:
- repetibilidade da máquina;
- heterogeneidade do material da amostra.

Esses fatores são confundidos e, portanto, ambos estão incluídos neste termo. Recomenda-se relatar a incerteza total de medição com o valor de s_x como medida conservadora para a variação em K_V devido à heterogeneidade do material.

O valor de v_x, o número de graus de liberdade de *u(x)*, é calculado como *n-1*.

Polarização da temperatura

O efeito da polarização de temperatura, T_x, sobre a energia absorvida é extremamente dependente do material. Se o aço for testado na região de transição frágil-dúctil, pequenas mudanças de temperatura podem corresponder a grandes diferenças na energia absorvida. No momento da publicação, não é possível apresentar uma abordagem genérica e aceite para o cálculo da contribuição para a incerteza da energia absorvida correspondente à incerteza da temperatura de ensaio medida. Em vez disso, propõe-se complementar a declaração da incerteza de medição em termos de energia absorvida com uma declaração separada sobre u_T, a incerteza da temperatura de ensaio à qual a energia absorvida foi medida.

Resolução da máquina

O efeito da resolução da máquina é, na maioria dos casos, negligenciável em comparação com os outros fatores que contribuem para a incerteza. Uma exceção é o caso em que a resolução da máquina é grande e a energia medida é baixa. Nesse caso, a contribuição correspondente para a incerteza é calculada utilizando a fórmula abaixo.

$$u(r) = \frac{r}{\sqrt{3}}$$

Em que:

r - resolução da máquina

O número correspondente de graus de liberdade é ∞.

Incerteza combinada e expandida

Para calcular *u(KV),* os fatores que contribuem para a incerteza devem ser combinados. Uma vez que u_T é tratado separadamente e que os termos u(x), u_V e $u_{(r)}$ são independentes um do outro, a incerteza-padrão combinada é determinada utilizando a fórmula abaixo.

$$u(\overline{KV}) = \sqrt{u^2(\bar{x}) + u_V^2} + u^2(r)$$

Como regra geral: um procedimento para estimar a incerteza na energia do ensaio de impacto Charpy deve seguir as seguintes etapas.

Passo 1. Identificar os parâmetros para os quais a incerteza deve ser estimada.

O primeiro passo é listar as quantidades (medições) para as quais as incertezas devem ser calculadas. Muitas vezes, as medições intermédias são registadas pelo laboratório, mas não necessariamente comunicadas ao cliente.

Passo 2. Identificar todas as fontes de incerteza no ensaio.

Na etapa 2, o utilizador deve identificar todas as possíveis fontes de incerteza que possam ter um efeito (direto ou indireto) no ensaio. A lista não pode ser previamente identificada de forma exaustiva, uma vez que está exclusivamente associada ao procedimento de ensaio individual e ao aparelho utilizado.

Isso significa que uma nova lista deve ser preparada sempre que um determinado parâmetro de ensaio é alterado (por exemplo, quando um traçador é substituído por um computador).

No caso da medição da energia absorvida a partir do ensaio de impacto, é muito difícil calcular a influência de cada fonte de incerteza. Abordar a calibração usando um material de referência certificado (MRC) e tendo em consideração erros de precisão, repetibilidade do MRC e repetibilidade da amostra de teste é geralmente a melhor abordagem. Para a verificação indireta de uma máquina de impacto Charpy, 10 testes (5 x 2 conjuntos de amostras) devem ser realizados periodicamente usando um único MRC. No entanto, para um laboratório que realize ensaios de impacto numa gama de ligas, devem ser consideradas várias classes de resistência dos materiais.

Podem ser efetuadas outras medições para verificar se as dimensões da amostra e a temperatura estão dentro dos limites de tolerância. Caso não estejam dentro do intervalo estabelecido, estas medições não são utilizadas para corrigir os valores energéticos, mas é referido que:

- a energia de impacto medida é medida numa amostra de diferentes dimensões;
- a energia de impacto medida é medida a uma temperatura diferente.

Para simplificar os cálculos, recomenda-se agrupar as fontes significativas de incerteza nas seguintes categorias:

1. Energia de entrada Charpy devido à geometria do provete e do entalhe;
2. Incerteza do sistema de ensaio;
3. Incerteza do ambiente;
4. Incerteza do procedimento de ensaio.

Passo 3. Classificação da incerteza de acordo com o tipo A ou B.

Na terceira etapa, as fontes de incerteza são classificadas como do tipo A ou B, dependendo de como sua influência é quantificada. Se a incerteza for avaliada por meios estatísticos (a partir de várias observações repetidas), é classificada como tipo A, se for avaliada por qualquer outro meio, deve ser classificada como tipo B.

Os valores associados às incertezas do tipo B podem ser obtidos a partir de várias fontes, incluindo um certificado de calibração, informações do fabricante ou estimativas de peritos. Para incertezas do tipo B, o utilizador deve estimar a distribuição de probabilidade mais adequada para cada fonte.

Passo 4. Estimar a incerteza padrão para cada fonte de incerteza.

Nesta etapa, a incerteza padrão é estimada para cada fonte de entrada identificada. A incerteza-padrão é definida como um desvio-padrão e é derivada da incerteza da quantidade de entrada dividida pelo parâmetro, d_v, associado à distribuição de probabilidade presumida. São fornecidos divisores para as distribuições típicas mais prováveis de serem encontradas.

As influências individuais de cada fonte de incerteza sobre a energia absorvida são muito complexas e impraticáveis. A maneira mais fácil é usar um MRC para calibrar todo o sistema e considerar erros, repetibilidade do MRC e repetibilidade da amostra de teste.

Passo 5. Cálculo da incerteza combinada u_c

Assumindo que as fontes individuais de incerteza não estão correlacionadas, a incerteza combinada do mensurando, $u_c(y)$, pode ser calculada utilizando a raiz quadrada da soma:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} [c_i \cdot u(x_i)]^2}$$

Em que:

$_{xi}$ - o coeficiente de sensibilidade associado a x_i.

Esta incerteza corresponde a mais ou menos um desvio-padrão na lei da distribuição normal que representa a quantidade estudada.

Passo 6. Cálculo da incerteza expandida *U*.

A incerteza expandida, *U*, é definida como "o intervalo sobre o resultado de uma medição que se pode esperar que abranja uma grande parte da distribuição de valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos ao mensurando". Obtém-se multiplicando a incerteza combinada, u_c, por um fator de cobertura, *k*, que é selecionado com base no nível de confiança exigido.

Para uma distribuição de probabilidade normal, o fator de cobertura mais comumente usado é 2, que corresponde a um intervalo de confiança de 95,4% (na verdade, 95% para fins mais práticos). A incerteza expandida, *U*, é, portanto, mais ampla do que a incerteza combinada, u_c.

Quando o cliente necessita de um nível de confiança mais elevado (por exemplo, para a indústria aeroespacial, eletrónica, etc.), é utilizado um fator de cobertura de 3 para que o nível de confiança correspondente aumente para 99,73%.

Nos casos em que a distribuição de probabilidade de u_c não seja normal ou em que o número de pontos de dados utilizados na análise de tipo A seja pequeno, o valor de *k* deve ser calculado a partir dos graus de liberdade dados pelo método de Welsh-Satterthwaite.

Passo 7. Comunicar os resultados.

Uma vez estimada a incerteza expandida, os resultados devem ser comunicados do seguinte modo:

$$V = y \pm U$$

em que:

V - valor estimado do mensurando,

y - resultado médio do ensaio (ou medição),

U - incerteza expandida associada a *y*.

A incerteza expandida relatada baseia-se numa incerteza padrão multiplicada por um fator de cobertura, *k = 2*, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de cobertura, de aproximadamente 95%.

3.2.1.3. Incerteza no ensaio de dobragem

Um procedimento para estimar a incerteza na medição da dureza pelo método de calibração indireta, há várias etapas a seguir.

Passo 1. Identificar os parâmetros para os quais a incerteza deve ser estimada.
O primeiro passo é listar as quantidades (medições) para as quais as incertezas devem ser calculadas, que são apresentadas na tabela 17, que apresenta os parâmetros que geralmente são relatados nas medições de dureza pelo método de calibração indireta. Nenhuma destas medições é medida diretamente, mas é determinada a partir de outras grandezas (ou medições).

Passo 2. Identificar todas as fontes de incerteza no teste.
Na etapa 2, o utilizador deve identificar todas as possíveis fontes de incerteza que possam ter um efeito (direto ou indireto) no ensaio. A lista não pode ser previamente identificada de forma exaustiva, uma vez que está exclusivamente associada ao procedimento de ensaio individual e ao aparelho utilizado.

Este procedimento deve incluir estimativas relativas às seguintes fontes, utilizando o método de calibração indireta:

- Incerteza devido à calibração dos blocos de referência;
- A incerteza do erro máximo admissível de acordo com as normas;
- Incerteza devida à repetibilidade em determinadas condições de ensaio;

Passo 3. Classificação da incerteza de acordo com o tipo A ou B.
Na terceira etapa, as fontes de incerteza são classificadas como do tipo A ou B, dependendo de como sua influência é quantificada. Se a incerteza for avaliada por meios estatísticos (a partir de várias observações repetidas), é classificada como tipo A, se for avaliada por qualquer outro meio, deve ser classificada como tipo B.

Os valores associados às incertezas do tipo B podem ser obtidos a partir de várias fontes, incluindo um certificado de calibração, informações do fabricante ou estimativas de peritos. Para incertezas do tipo B, o utilizador deve estimar para cada fonte a distribuição de probabilidade mais adequada.

Passo 4. Estimar a incerteza padrão para cada fonte de incerteza.

Nesta etapa, a incerteza padrão, *u*, é estimada para cada fonte de entrada identificada. A incerteza-padrão é definida como um desvio-padrão e é derivada da incerteza da quantidade de entrada dividida pelo parâmetro, d_v , associado à distribuição de probabilidade presumida. São fornecidos divisores para as distribuições típicas mais prováveis de serem encontradas.

Em muitos casos, a quantidade de entrada da medição pode não estar nas mesmas unidades que a quantidade de saída. Por exemplo, uma contribuição para a dureza é a rugosidade da superfície. Neste caso, a quantidade de entrada é a rugosidade (mm), mas a quantidade de saída é a dureza que é HRB. Nesse caso, um coeficiente de sensibilidade é usado para converter a rugosidade em HRB.

Passo 5. Cálculo da incerteza combinada u_c

Assumindo que as fontes individuais de incerteza não estão correlacionadas, a incerteza combinada do mensurando, $u_c(y)$, pode ser calculada utilizando a raiz quadrada da soma:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} [c_i \cdot u(x_i)]^2}$$

Em que:

$_{xi}$ - o coeficiente de sensibilidade associado a x_i.

Esta incerteza corresponde a mais ou menos um desvio-padrão na lei da distribuição normal que representa a quantidade estudada.

A incerteza combinada tem um nível de confiança associado de 68,26%.

Passo 6. Cálculo da incerteza expandida *U.*

A incerteza expandida, *U*, é definida como "o intervalo sobre o resultado de uma medição que se pode esperar que abranja uma grande parte da distribuição de valores que poderiam razoavelmente ser atribuídos ao mensurando". Obtém-se multiplicando a incerteza combinada, u_c, por um fator de cobertura, *k*, que é selecionado com base no nível de confiança exigido.

Para uma distribuição de probabilidade normal, o fator de cobertura mais comumente usado é 2, que corresponde a um intervalo de confiança de 95,4% (na verdade, 95% para fins mais práticos). A incerteza expandida, *U*, é, portanto, mais ampla do que a incerteza combinada, u_c.

Quando o cliente necessita de um nível de confiança mais elevado (por exemplo, para a indústria aeroespacial, eletrónica, etc.), é utilizado um fator de cobertura de 3 para que o nível de confiança correspondente aumente para 99,73%.

Nos casos em que a distribuição de probabilidade de u_c não seja normal ou em que o número de pontos de dados utilizados na análise de tipo A seja pequeno, o valor de k deve ser calculado a partir dos graus de liberdade dados pelo método de Welsh-Satterthwaite.

Passo 7. Comunicar os resultados.

Uma vez estimada a incerteza expandida, os resultados devem ser comunicados do seguinte modo:

$$V = y \pm U$$

Em que:

V - valor estimado do mensurando,
y - resultado médio do ensaio (ou medição),
U - incerteza expandida associada a y.

A incerteza expandida relatada baseia-se em uma incerteza padrão multiplicada por um fator de cobertura, $k = 2$, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de cobertura, p , de aproximadamente 95%.

3.2.1.4. Incerteza nos ensaios de dureza

Independentemente do tipo de fontes, para a dureza, existem duas possibilidades para a determinação da incerteza.
- Uma possibilidade baseia-se na avaliação de todas as fontes relevantes que aparecem durante uma calibração direta. Como referência, está disponível uma orientação Euramet [3];
- A outra possibilidade baseia-se na calibração indireta utilizando um bloco de referência de dureza (MRC - material de referência certificado) [3, 4]. No anexo D da norma ISO 6507-1 é apresentada uma orientação para a determinação.

Pode nem sempre ser possível quantificar todos os contributos identificados para a incerteza. Neste caso, pode obter-se uma estimativa da incerteza-padrão de tipo A a partir da análise estatística de indentações repetidas no provete. Deve-se ter cuidado, se as incertezas padrão dos tipos A e B forem resumidas, para que as contribuições não sejam contadas duas vezes (JCGM 100:2008, Cláusula 4).

Ao determinar uma tolerância específica que a máquina tem de satisfazer, a incerteza associada à utilização de equipamento de medição e/ou normas de referência foi incorporada nesta tolerância, pelo que não seria adequado ter mais em conta esta incerteza, por exemplo, reduzindo a tolerância através da incerteza de medição. Isto aplica-se a todas as medições feitas ao realizar uma verificação periódica da máquina.

O procedimento calcula uma incerteza combinada, u_H, pelo método da raiz quadrada da soma (RQS) a partir das diferentes fontes (Tabela 18 - contém todos os símbolos e sua designação). A incerteza expandida, U, é derivada de u_H multiplicando-se pelo fator de cobertura k = 2.

O desvio, b, de uma máquina de teste de dureza (também chamado de "erro"), que é derivado da diferença entre:
- o valor de calibração certificado do bloco de referência de dureza utilizado,
- o valor médio de dureza das cinco indentações feitas neste bloco durante a calibração da máquina de ensaio de dureza (ISO 6507-2) pode ser aplicado de diferentes formas na determinação da incerteza.

São indicados dois métodos para determinar a incerteza das medições de dureza:
- O método M1 explica o desvio sistemático da máquina de dureza de duas formas diferentes. Numa das abordagens, a contribuição da incerteza do desvio sistemático é adicionada aritmeticamente a esse valor. Na outra abordagem, é feita uma correção no resultado da medição para compensar o viés sistemático.
- O método M2 permite determinar a incerteza sem ter de considerar a magnitude do desvio sistemático [2, 3].

Nas normas de ensaio de dureza, o material de referência certificado é equivalente ao bloco de referência de dureza, ou seja, uma peça de material com um valor certificado e incerteza associada.

Procedimentos para o cálculo da incerteza: Valores de medição da dureza

A. Procedimento tendencioso (método M1)

O método M1 para a determinação da incerteza de medição é explicado na Tabela 17.

Pode-se esperar que o desvio da medição, *b*, da máquina de ensaio da dureza seja um efeito sistemático. No JCGM 100:2008[2], recomenda-se a utilização de uma correção para compensar os efeitos sistemáticos, e esta é a base do M1. O resultado da utilização deste método é que todos os valores de dureza determinados, *x*, têm de ser reduzidos em b ou a incerteza, *U*, tem de ser aumentada em *b*. O procedimento para a determinação de U_{M1} é explicado na Tabela 18 (em inglês).

Step	Sources of uncertainty	Symbols	Formula	Literature/certificate	Example
1 M1, M2	Measurement result	x			x = 410 HV 30
2 M1	Bias value, b, and uncertainty, U_{HTM}, of the bias of the hardness testing machine from the indirect verification	b U_{HTM} u_{HTM}	$u_{HTM} = \frac{U_{HTM}}{2}$	b and U_{HTM} according to an indirect verification report using a CRM of $\bar{H}_{CRM}$ = 401,6 HV 30 (see NOTE 1)	b = 1,62 HV 30 U_{HTM} = 5,14 HV 30 $u_{HTM} = \frac{5,14}{2} = 2,57$ HV 30
3 M2	Maximum permissible deviation of the bias	b_E	b_E = Maximum positive value of permissible bias	Permissible bias, b, according to ISO 6507-2:2017, Table 5	b_E = 3 % $b_E = \frac{3 \times 410}{100} = 12,3$ HV 30
4 M2	Standard uncertainty due to the maximum permissible deviation of the bias	u_E	$u_E = b_E / \sqrt{3}$	Rectangular distribution	$u_E = \frac{12,3}{\sqrt{3}} = 7,10$ HV 30
5 M1, M2	The standard deviation of repeatability measurements	s_H	$s_H = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(H_i - \bar{H})^2}$	Five measurements are made by the laboratory on a CRM having a hardness similar to the test sample (see NOTE 2)	s_H = 3,2 HV 30
6 M1, M2	Standard uncertainty due to lack of repeatability	U_H	$u_H = t \times s_H$	t = 1,14 for n = 5 (see JCGM 100:2008)	$u_H = 1,14 \times 3,2 = 3,69$ HV 30
7 M1, M2	Standard uncertainty due to resolution of the hardness value indicating display	u_{ms}	$u_{ms} = -\frac{2x}{d} \times \frac{\delta_{ms}}{2\sqrt{3}}$	δ_{ms} = 0,000 51 mm x = 410 HV 30 d = 0,368 4 mm (see NOTE 3)	$u_{ms} = -\frac{2 \times 410,0}{0,368\,4} \times \frac{0,000\,51}{2\sqrt{3}} = -0,33$ HV 30

Tabela 18 - Determinação da incerteza expandida de acordo com os métodos M1 e M2.

A incerteza de medição expandida combinada para uma única medição de dureza, *x*, é calculada de acordo com a fórmula apresentada.

$$U_{M1} = k \cdot \sqrt{u_H^2} + 2 \cdot u_{ms}^2 + u_{HTM}^2$$

em que:

u_H - contribuição para a incerteza de medição devido à falta de repetibilidade de medição da máquina de ensaio de dureza;

u_{ms} - contribuição para a incerteza de medição devido à resolução do equipamento de ensaio de dureza. Deve ser considerado tanto a resolução do instrumento indicador de medição do comprimento como a resolução ótica do microscópio de medição. Na maioria dos casos, a resolução global do sistema de medição deve ser incluída duas vezes no cálculo de u_H devido à resolução independente das posições de ambas as extremidades da diagonal;

u_{HTM} - contribuição para a incerteza de medição devido à incerteza padrão da medição de distorção, *b*, gerada pela máquina de ensaio de dureza (este valor é relatado como resultado da verificação indireta definida na ISO 6507-2) e é definido de acordo com a fórmula abaixo.

$$u_{HTM} = \sqrt{u_{CRM}^2} + u_{HCRM}^2 + u_{ms}^2$$

em que:

u_{MRC} - contribuição para a incerteza de medição devida à incerteza de calibração do valor certificado do MRC de acordo com o certificado de calibração para k = 1;

u_{HMRC} - contribuição para a incerteza de medição devido à combinação da falta de repetibilidade de medição da máquina de ensaio de dureza e a não uniformidade de dureza do MRC, calculada como o desvio-padrão da média das medições de dureza ao medir o MRC;

u_{ms} - contribuição para a incerteza de medição devido à resolução da máquina de ensaio de dureza ao medir o MRC.

O resultado da medição pode ser comunicado de duas formas:

- como X_{corr}, em que o valor de medição, x, é corrigido para o desvio de medição, b, calculado de acordo com a fórmula abaixo.

$$X_{corr} = (x - b) \pm U_{M1}$$

- como Xu_{corr}, em que o valor de medição, x, não é corrigido para o desvio de medição, b, e a incerteza expandida, U, é aumentada pelo valor absoluto do desvio de acordo com a fórmula abaixo.

$$X_{ucorr} = x \pm [U_{M1} + |b|]$$

Quando se utiliza o método M1, pode também ser adequado incluir contribuições adicionais de incerteza dentro do termo RSS relacionadas com o valor de b empregado. Este será particularmente o caso quando - a dureza medida for significativamente diferente dos níveis de dureza dos blocos utilizados durante a calibração da máquina,

- o valor do desvio da máquina varia significativamente ao longo da sua gama calibrada,
- o material a medir é diferente do material dos blocos de referência de dureza utilizados durante a calibração da máquina,
- o desempenho diário (reprodutibilidade) da máquina de ensaio de dureza varia significativamente.

Os cálculos dessas contribuições adicionais para a incerteza de medição não são discutidos aqui. Em todas as circunstâncias, é necessário um método robusto para estimar a incerteza associada a b.

b. Procedimento sem distorções (método M2)

Em alternativa ao método M1, o método M2 pode ser utilizado em algumas circunstâncias. O método M2 só é válido para máquinas de ensaio de dureza que tenham passado por uma verificação indireta de acordo com a norma ISO 6507-2 utilizando o valor l*b*l +U_{HTM}, e não apenas o valor do desvio, *b*, ao determinar a conformidade com a variação máxima admissível do desvio (ISO 6507-2). No método M2, o desvio máximo admissível, b_E, (a quantidade positiva pela qual a leitura da máquina pode diferir do valor do bloco de referência), conforme especificado na norma ISO 6507-2:2017. Não há correção dos valores de dureza em relação ao limite do desvio. O procedimento para a determinação de *U* é explicado na Tabela 17.

A incerteza de medição expandida combinada para uma única medição futura de dureza é calculada de acordo com a fórmula abaixo.

$$U_{M2} = k \cdot \sqrt{u_H^2} + 2 \cdot u_{ms}^2 + u_E^2$$

Em que:

u_H - contribuição para a incerteza de medição devido à falta de repetibilidade de medição da máquina de ensaio de dureza;

u_{ms} - contribuição para a incerteza de medição devido à resolução da máquina de ensaio de dureza. Deve ter-se em conta tanto a resolução do instrumento indicador de medição do comprimento como a resolução ótica do microscópio de medição. Na maioria dos casos, a resolução global do sistema de medição deve ser incluída duas vezes no cálculo de u_H devido à resolução independente das posições de ambas as extremidades da diagonal longa;

u_E - contribuição para a incerteza de medição devido á variação máxima admissível do desvio, $u_E = b_E / \sqrt{3}$ (distribuição retangular), em *que* b_E é a variação máxima admissível do desvio conforme especificado na norma ISO 6507-2, e o resultado da medição é calculado de acordo com a fórmula abaixo.

$$X = x \pm U_{M2}$$

3.2.2. Documentos de Referência

A aplicação destas medições de incerteza requer a utilização das normas de referência (em inglês). Nos casos de referências datadas, aplica-se a última emissão de documento/norma.

EN ISO / IEC 17025	General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories
EN ISO / TR 14253-1	Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment *Part 1: Decision rules for verifying conformity or nonconformity with specifications*
EN ISO / TR 14253-2	Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment *Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification*
EN ISO / TR 14253-3	Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment *Part 3: Guidelines for achieving agreements on measurement uncertainty statements*
EN ISO / TR 14253-4	Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment *Part 4: Background on functionality limits and specification limited in decision rules*
EN ISO / TR 14253-5	Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment *Part 5: Uncertainty in verification testing of indicating measuring instruments*
EN ISO / TR 14253-6	Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment *Part 6: Generalized decision rules for the acceptance and rejection of instruments and workpieces*
EN ISO / IEC 98-3 / Suppl . 1	Uncertainty of measurement *Part 3: Guides to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)* *Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method*
PD IEC GUIDE 115:2021	Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector
SMT4-CT97-2165	Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials The Determination of Uncertainties in Charpy Impact Testing UNCERT COP 06: 2000
EN 10045-1	Metallic materials - Charpy impact test - Part 1: Test method
EN 10045-2	Metallic materials - Charpy impact test - Part 2: Verification of the testing machine
SMT4-CT97-2165	Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials The Determination of Uncertainties in Fatigue Crack Growth Measurement UNCERT COP 05: 2000
ASTM E647	Standard Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates
ASTM E740	Structural Components - Residual Strength
SMT4-CT97-2165	Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials The Estimation of Uncertainties in Hardness Measurements

	UNCERT COP 14: 2000
EN ISO 6506 / 1	Metallic materials - Brinell hardness test - Part 1: Test method
EN ISO 6506 / 2	Metallic materials - Brinell hardness test - Part 2: Verification and calibration of testing machines
EN ISO 6506 / 3	Metallic materials - Brinell hardness test - Part 3: Calibration of reference blocks
EN ISO 6507 / 1	Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method
EN ISO 6507 / 2	Metallic materials - Vickers hardness test - Part 2: Verification and calibration of testing machines
EN ISO 6507 / 3	Metallic materials - Vickers hardness test - Part 3: Calibration of reference blocks
EN ISO 6508 / 1	Metallic materials – Rockwell hardness test - Part 1: Test method
EN ISO 6508 / 2	Metallic materials – Rockwell hardness test - Part 2: Verification and calibration of testing machines and indenters
EN ISO 6508 / 3	Metallic materials – Rockwell hardness test - Part 3: Calibration of reference blocks
ASTM E 10-96	Standard Test Method for Brinell Hardness
ASTM E 18-97a	Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials
ASTM A 370-97a	Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
IS 14874	General requirements for the competency of testing and calibration laboratories
EN 10002-Part 1	tension testing – method of testing at room temperature
ASTM E8M	Standard test methods for tension testing of metallic materials (metric)
ISO 5725	Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results
ISO/IEC 98-3	Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement
PD IEC GUIDE 115:2021	Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector
ISO/TS 21748	Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimated in measurement uncertainty estimation
ISO/TC 69	Application of Statistics Methods, SC 6, Measurement Methods and Results
ISO/TS 19036	Microbiology of Food and Animal feeding stuffs – Guidelines for the Estimation of Measurement Uncertainty for Quantitative Determinations

3.2.3. Bibliografia

1. GM Tewari, (2016), Measurement Uncertainty, International workshop & training, program on good, food laboratory practices, 15-19 November 2016, Export Inspection Agency, Mumbai ;
2. Stephanie Bell, (2001), A Beginner's Guides to Uncertainty of Measurement, Measurement Good Practice Guide No. 11 (Issue 2), Center for Basic, Thermal and Length Metrology, National Physical Laboratory, Issue 2 with amendments March 2001;
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Measurement_uncertainty;
4. Manual of Codes of Practice for the determination of uncertainties in mechanics tests on metallic materials. Project UNCERT, EU Contract SMT4-CT97-2165, Standards Measurement & Testing Programme, ISBN 0-946754-41-1, Issue 1, September 2000;

5. Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials, The Determination of Uncertainties in Charpy Impact Testing, Code of Practice No. 06;
6. Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials, The Determination of Uncertainties in Fatigue Crack Growth Measurement , Code of Practice No. 05;
7. Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials, The Estimation of Uncertainties in Hardness Measurements, Code of Practice No. 14;
8. S. Tarafder, KK Gupta, (2004), Estimation of Uncertainty in Mechanical Testing , Paper published inStudy Material of Refresher Course on ISO/IEC 17025 Standards , Organized by NABL and CGCRI, Kolkata 27-28 Aug 2004;
9. Uncertainty for Construction Materials & Geotechnical Testing Labs, P103d – Annex: Policy on Estimating measurement ; The American Association for Laboratory Accreditation ;
10. Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector; PD IEC GUIDE 115:2021;
11. A Guide on Measurement Uncertainty in Chemical & Microbiological Analysis; Technical Guide 2, The SAC Accreditation Program is managed by SPRING Singapore;
12. ISO 14253-1, Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 1: Decision rules for verifying conformity or nonconformity with specifications;
13. ISO 14253-2, Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification;
14. ISO 14253-3, Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 3: Guidelines for achieving agreements on measurement uncertainty statements;
15. ISO 14253-4, Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 4: Background on functional limits and specification limited in decision rules
16. ISO 14253-5, Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 5: Uncertainty in verification testing of indicating measuring instruments;
17. ISO 14253-6, Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment - Part 6: Generalized decision rules for the acceptance and rejection of instruments and workpieces;
18. ISO/IEC GUIDE 98-3/Suppl.1, Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method.

3.3. Exercícios para a sala de aula

Com base na norma EN ISO/CEI 17025/2017, todos os laboratórios de ensaio devem ter e aplicar um procedimento para estimar a incerteza. Avaliar a incerteza e declarar o seu valor no relatório de análise é necessário quando a incerteza é suscetível de afetar negativamente a conformidade em relação a uma especificação.

Nos próximos dois exercícios você será capaz de entender melhor com dois exemplos de trabalho relacionados à medição de incerteza no caso de ensaios de tração e tenacidade.

3.3.1. Exercício 1 – Cálculo da Incerteza de Medição em Ensaios de Dureza

Valores medidos na amostra-mãe HV10

Medição 1	188
Medição 2	188
Medição 3	190
Medição 4	193
Medição 5	192

u_{e2r} – retirado da ISO 6507-2 (tabela 5)

u_{e2r} = 0,0288

X_{CRM} – valor médio de dureza por padrão (do certificado de calibração)

X_{CRM} = 192

u_e – incerteza padrão de acordo com o desvio máximo admissível (%)

u_e = 1,97485714 %

u_{CRM} – incerteza de calibração (do certificado de calibração)

u_{CRM} = 1 %

u_H – incerteza do equipamento de dureza (do certificado de calibração)

u_H = 0,5 %

x= 190,2

S_x	2,28035085	2,280351
	0,25	5,2
	4,84	
	4,84	
	0,04	
	7,84	
	3,24	

u_x – incerteza das marcas de medição

t = 1,14 pt n = 5 (n – número de medições) n= 5

t = 1,14

u_x 1,162576

H= 190,2

d= 0,221 mm

δm= 0,0001 mm

u_{mas} – incerteza padrão

u_{mas} = 0,049689

u_{corr} – medição da incerteza revista e alargada

K – fator de cobertura (k=2)

k= 2

u_{corr} = 5,100633 HV

incerteza c= 2,681721 %

3.3.2. Exercício 2 – Cálculo da Incerteza de Medição no ensaio de Charpy

Cofinanciado pelo
Programa Erasmus+
da União Europeia

Energia de impacto						
Tamanho	Incerteza padrão	Lei da distribuição	Coeficiente de sensibilidade	Incerteza parcial	Obs.	
a [mm]	0,1	retangular	1	0,1	comparador eletrónico	tipo B
b [mm]	0,1	retangular	1	0,1	micrómetro	
h [mm]	0,1	retangular	1	0,1	micrómetro	
r [mm]	1	retangular	1	1	microscópio	
l [mm]	1	retangular	1	1	substituto	
KV, KU [J]	0,5	retangular	1	0,5	martelo pendular	
KV, KU [J] mas	3,38	normal	1	3,38	Medição	tipo A
Incerteza composta				**3,70**		
Incerteza Ue alargada com uma probabilidade de 95%				**7,4**	%	

x	KV
x1	70
x2	78
x3	79
x4	73
x5	76
x6	70
x7	78
x8	72
x9	71
x10	71
x11	77
x12	75
Número de determinações	12
Média	74,16667
Desvio médio quadrado	3,379977
Um=S/sqrt(n)	0,975715
Um com probabilidade de 95%	2,51
Um com probabilidade de 95% [%]	**3,38**

x	Cr	EL	raport 40 RAAN / 2009
x1	28	6,86	
x2	27	6,54	
x3	27	6,54	
x4	28	6,75	
x5	28	6,6	
x6	27	7,2	
Número de determinações	6	6	
Média	27,5	6,748333	
Desvio médio quadrado	0,547723	0,255062	
Um=S/sqrt(n)	0,223607	0,104129	
Um com probabilidade de 95%	0,57	0,27	
Um com probabilidade de 95% [%]	**2,07**	**4,00**	