

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ELEMENTOS DE MÁQUINAS I

APOSTILA PARA O CURSO

2º Semestre de 2001

UNIÃO DE COMPONENTES METÁLICOS POR SOLDAGEM

AUTOR:

PROF. DR. AUTELIANO ANTUNES DOS SANTOS JÚNIOR
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO - FEM - UNICAMP

Resumo:

Essa apostila trata da união por soldagem de elementos mecânicos, abordada na Disciplina EM 718 - Elementos de Máquinas I. Descreve os tipos principais de uniões por soldagem encontrados na prática e os esforços que sofrem. A partir da estimativa da resistência, seja para o carregamento estático ou dinâmico, demonstra como projetar a união, permitindo o cálculo das dimensões das soldas ou da segurança em utilizar soldas previamente dimensionadas. Trata-se de um resumo, sendo necessária a consulta a textos especializados para aprofundamento.

1. Introdução

A união de elementos metálicos é desejável na montagem de estruturas que transmitam ou suportem os esforços que surgem na execução do trabalho mecânico pela máquinas. A seleção da forma adequada de transmitir esses esforços entre as disponíveis está relacionada a possibilidade técnica de aplicação, a possibilidade construtiva, ao custo, a disponibilidade de materiais e ao conhecimento, entre outros aspectos de menor peso. Assim, um cubo poderia ser preso a um eixo por um pino passante, mas isso concentraria tensões; o mesmo cubo poderia ser preso por soldagem, mas causaria problemas na estrutura do material, impediria que o mesmo fosse retirado sem destruição e reduziria a flexibilidade do conjunto; o mesmo poderia ser preso ainda por interferência, não concentraria tensões mas não poderia ser retirado e montado novamente; também poderia ser preso por chaveta, o que também introduziria o concentrador de tensões. A análise econômica mostra que o custo da montagem, observado somente como o custo para a instalação do cubo no eixo, seria bem menor para a soldagem do que para as demais soluções, e que a chaveta poderia ser a solução de maior custo, já que inclui usinagem do eixo, do cubo e a confecção da chaveta.

Essa apostila é sobre soldagem. Em particular, descreve o projeto de uniões soldadas, já que os tipos e características das soldas foram vistos em disciplinas anteriores a Elementos de Máquinas. No decorrer do texto são descritas as principais formas de unir elementos metálicos encontradas na construção de máquinas e o projeto para os casos de carregamento estático e dinâmico. Ao engenheiro compete analisar cada um dos tipos de união soldada apresentados e classificar sua união em algum deles. Com isso poderá dimensionar suas uniões com os conceitos apresentados nessa apostila. Os conceitos aqui expostos estão baseados em livros tradicionais de Elementos de Máquinas e Projeto de Sistemas Mecânicos.

2. Tipos de Solda e suas Características

Os tipos de solda, ou processos de soldagem, mais comuns são:

Solda Elétrica: usa varetas de solda com revestimento que se vaporiza, protegendo a soldagem (Ex. CO₂, Argônio).

MIG (Solda com gás inerte) - Utiliza um eletrodo consumível e um gás circunda eletrodo durante a soldagem. O gás serve para a proteção do arco.

TIG - Utiliza um eletrodo não consumível. A solda é colocada na região de soldagem manualmente, na forma de uma vareta. Usa hélio ou argônio que envolve o eletrodo. Da mesma forma que para a MIG, o gás serve para a proteção do arco.

Arco Submerso: Principalmente utilizado para superfícies planas. Um material granular é depositado na frente da solda e cobre a região a ser soldada. O eletrodo consumível é protegido pelo filme que é criado pelo material granular aquecido. Permite soldagem de qualidade superior quando comparada aos processos descritos anteriormente.

Soldagem por resistência: Baseia-se na passagem de corrente elétrica pelas superfícies em contato. Essa corrente aquece as superfícies causando a soldagem. O efeito é maior com o aumento da pressão externa entre as superfícies.

Aquecimento: A soldagem pode se dar também por qualquer outro processo que aqueça as superfícies que serão soldadas. Esse aquecimento pode ser por gás, laser, feixe de elétrons, ... O importante para que as superfícies se unam é que o calor seja suficiente para fundir as superfícies em contato.

A soldagem da superfície depende também da compatibilidade dos materiais utilizados. Materiais que não se misturam ao serem fundidos não podem ser utilizados. O material de adição (solda) deve ter características semelhantes aos dos materiais que estará unindo, já que não se deseja uma solda nem mais fraca nem mais forte do que os materiais originais.

2.1. Fatores que Influenciam a Qualidade da União Soldada

Quando duas peças são soldadas, não se deseja que a união resultante represente um ponto crítico do conjunto montado. Assim, a união soldada deve ter resistência tão grande como a dos materiais antes da soldagem, para evitar que a junção seja um ponto de menor resistência, mas não tão grande que leve a um custo de soldagem (material e processo) muito elevado, já que a união só seria tão resistente quanto o mais fraco dos seus constituintes, no caso um dos materiais originais.

O processo de soldagem requer o aquecimento das peças que serão unidas. Esse aquecimento gera uma região chamada de "zona termicamente afetada", que é a região próxima da solda onde o calor adicionado tem influência significativa. A influência pode se dar pela mudança de estrutura dos materiais originais, devido ao aquecimento, e também pela mistura entre o material da solda e os materiais originais. Essas alterações metalúrgicas podem enfraquecer a junção, fazendo com que a resistência desta seja menor do que a esperada.

O processo de aquecimento localizado também gera um gradiente de tensões no interior das peças. A região próxima a solda, estando mais aquecida, tende a se expandir de forma diferente das regiões mais afastadas. Essa expansão diferencial pode gerar o escoamento de porções localizadas do material, causando tensões residuais quando a junção é resfriada. O fato de que as tensões são localizadas faz com que algumas regiões se deformem de forma diferente das demais, causando a distorção da junção. Isso é muito comum em grandes estruturas soldadas, onde as partes soldadas raramente ficam na forma originalmente desejada.

A fim de evitar os problemas citados, algumas providências podem ser tomadas. Para o problema de tensões, em especial o de tensões de tração, o jateamento superficial com granalhas pode ser utilizado. Esse processo induz tensões superficiais compressivas e melhora o acabamento da superfície, providências que levam a uma menor efetividade das tensões na propagação de eventuais trincas de fadiga.

O aquecimento prévio das peças que serão soldadas também permite uma sensível redução na criação das tensões residuais, já que o diferencial de temperaturas será menor. O processo também reduz a distorção decorrente das tensões. Alívio de tensões após a soldagem também é bastante empregado com a mesma finalidade.

Para a maior segurança do projetista e, obviamente, dos usuários de seu projeto, é recomendado que sejam construídos protótipos das junções soldadas para testes, quando o risco de uma eventual falha puder levar a situações catastróficas. Muitas são as variáveis de projeto que precisam ser controladas no projeto de junções soldadas e todo o cuidado é pouco em situações de risco. O fator humano também é muito importante, já que o soldador influi decisivamente na qualidade da solda. Não há como prever todos os aspectos psicológicos envolvidos na execução adequada do trabalho de soldagem, nem por valores elevados de coeficiente de segurança. A construção de protótipos, se possível com os mesmos profissionais que executarão o trabalho final, é a melhor prevenção para evitar danos maiores.

Seguir códigos e normas é imprescindível para o correto desenvolvimento do projeto. Fazer uso de projetos que não envolvam a consulta a procedimentos normalizados e recomendações é um risco que o bom senso necessário ao exercício da engenharia recomenda evitar. Além de toda a informação baseada em conhecimento prévio contida nesses documentos, o aspecto legal envolvido no projeto seguro não deve ser minimizado. Um projeto bem feito, além de pautar-se pelo bom senso e a aplicação de conhecimento atualizado, deve prever o indesejável, isto é, a falha e suas consequências. Caso normas e códigos sejam seguidos, o engenheiro estará respaldado nos procedimentos adotados para provar que não houve má fé ou má engenharia de sua parte.

2.2. Especificação

As soldas são normalmente especificadas pela resistência à tração do material utilizado, seguida de detalhes construtivos e das dimensões. Como exemplo, a especificação da Associação Americana de Soldagem (AWS) é:

$$\text{AWS E60XX } h_1 \times h_2 \times L$$

Nessa forma de especificação, a organização é citada, depois vem o tipo de solda (E para eletrodo revestido), XX representam características adicionais constantes na norma de especificação e as dimensões h_1 , h_2 e L representam a dimensão lateral do filete de solda, a dimensão da outra lateral (perna) e o comprimento do filete. Muitas outras formas de representar a solda são normalizadas, dependendo da norma utilizada e da região onde essa se aplica. No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas recomenda a especificação de forma semelhante a da AWS.

3. Modelos para União Soldada de Peças

As principais configurações para a união de peças metálicas por solda são apresentadas a seguir. Diversas outras configurações podem ser encontradas na prática, mas as mostradas permitem a análise de praticamente todas por similaridade.

3.1. Solda de Topo

A configuração mais simples para a soldagem de elementos metálicos é a de solda de topo. Esse tipo de soldagem é utilizado para unir as extremidades de dois elementos, como pinos, chapas etc... A figura 1 mostra quatro arranjos para esse tipo de soldagem. O arranjo mostrado em (a) representa a pior configuração possível, tanto em termos de concentração de tensões como em termos da mistura dos materiais, levando a uma solda de características de resistência bem diferentes daquelas das peças originais. O arranjo mostrado em (b) serve para aumentar a área de contato entre a solda e as peças, diminuir as tensões e é utilizado principalmente para a

soldagem em peças em um só dos lados. O arranjo em (c) mostra a melhor configuração e é utilizado quando os passes de solda podem ser dados de ambos os lados, o que uniformiza a solda quanto a flexão e permite uma distribuição melhor da rigidez do conjunto. O arranjo em (d) é uma variação econômica do arranjo em (b).

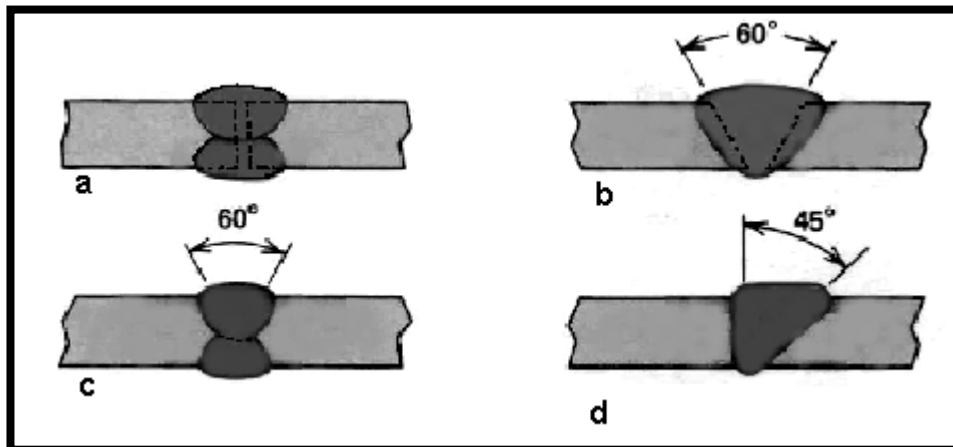


Figura 1 Arranjo para Soldas de Topo

O projeto da solda de topo consiste na comparação da tensão normal a qual as peças estão sujeitas com a resistência ao escoamento ou à ruptura do material da solda ou do material mais fraco entre os soldados. Caso haja variação no carregamento ao longo do tempo, os conceitos de fadiga deverão ser aplicados, conforme já visto na disciplina em curso.

3.2. Soldas Paralela e Transversal

As figuras 2 e 3 mostram filetes de solda em dois arranjos diferentes: paralelo e transversal, respectivamente. Na figura 2, os filetes de solda têm seu eixo axial na mesma direção da aplicação da força. Já na figura 3, o eixo das soldas é perpendicular a direção de aplicação da força. Daí vêm os nomes de filetes paralelos e filetes transversais.

Em ambos os tipos de arranjo mostrados nas figuras 2 e 3, os filetes suportam a carga F e têm a mesma largura (50 mm). No entanto, a carga nos filetes transversais BC é de tração na parte da solda em contato com a chapa superior, o mesmo acontece com a solda AD, na parte do filete em contato com a chapa inferior. Já no contato da solda AD com a chapa superior e no

contato da solda BC com a chapa inferior, as tensões são de cisalhamento. No caso dos filetes paralelos, as tensões são sempre de cisalhamento. Arranjos como estes dificultam a definição da forma de projetar a união soldada. Para resolver isso, os órgãos de normalização propõem um procedimento padrão para o projeto de soldas.

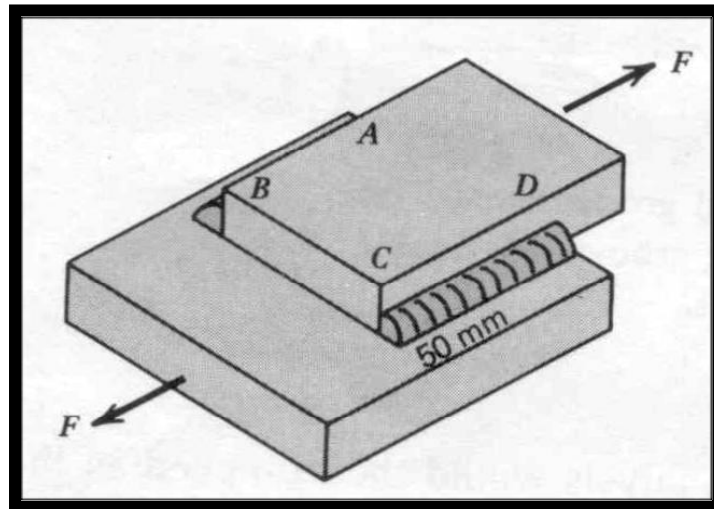


Figura 2 Filetes de Solda Paralelos para a União de Chapas

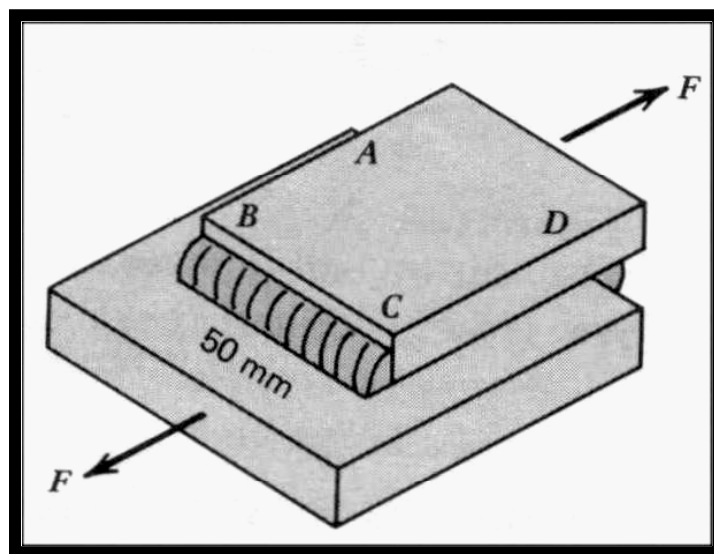


Figura 3 Filetes de Solda Transversais para a União de Chapas

A figura 4 mostra um filete de solda em uma viga soldada tipo T invertido. Nessa figura, o filete é mostrado em destaque, à direita. A forma correta de soldar está mostrada nesse

destaque. No destaque da solda à esquerda, a solda não preenche toda a espessura t , que é utilizada no dimensionamento, sendo considerada uma solda de baixa qualidade.

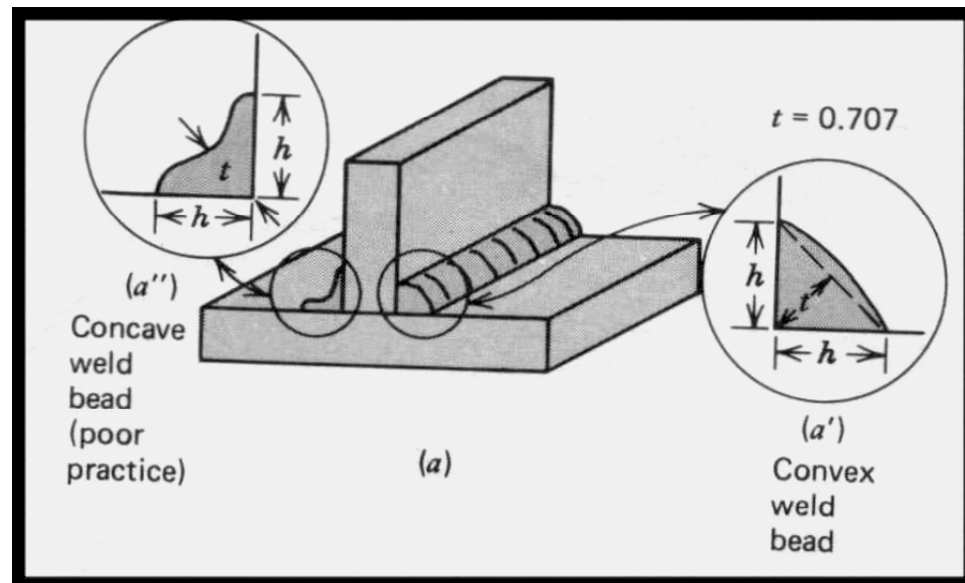


Figura 4 Filetes de Solda em Viga T invertida e Detalhes mostrando as dimensões, a forma correta de soldagem (à direita) e a incorreta (à esquerda)

A necessidade de preencher adequadamente toda a espessura t vem do procedimento normalizado de cálculo. Segundo esse procedimento, os filetes de solda devem ser projetados sempre considerando o cisalhamento da área formada por essa espessura e o comprimento do filete. Assim, soldas onde a espessura não é adequadamente preenchida podem estar subdimensionadas. A medida h mostrada na figura 4, chamada de dimensão lateral ou perna da solda, é a que deve ser especificada nos desenhos e instruções de soldagem. A espessura t pode ser calculada a partir de h , ou vice-versa, pela relação:

$$t = 0,707h \quad (1)$$

Por esse procedimento, em qualquer um dos casos apresentados nas figuras 2 e 3, os filetes de solda devem ser dimensionados comparando-se a tensão de cisalhamento, calculada pela relação entre F e a área ($t \cdot 50$), com a resistência ao cisalhamento das soldas, seja essa por escoamento ou tração, conforme especificado no projeto.

A resistência ao cisalhamento de aços pode ser dada pela Teoria da Energia de Distorção, para o caso de projeto contra falha por escoamento, ou pela tensão de ruptura ao cisalhamento. A resistência ao escoamento por cisalhamento é calculada por $S_{Sy} = (0,577.S_y)$, conforme visto anteriormente. A resistência a ruptura por cisalhamento em aços pode ser estimada por $S_{Su} = 0,8 S_u$.

3.3. Junções Especiais - Torção nas Soldas

As normas para cálculo de soldas trazem recomendações para diversos tipos de arranjos de soldagem. Dois tipos se destacam por serem gerais, ou seja, por permitir que os demais arranjos sejam obtidos a partir deles. São chamados de soldas a torção e soldas a flexão, devido a suas características geométricas. O arranjo de soldagem a torção é mostrado na figura 5. Neste arranjo as tensões em pontos extremos dos filetes de solda (em vermelho) podem ser calculadas por uma combinação das tensões de cisalhamento devidas à força cortante com as tensões de cisalhamento devido à torção que as soldas sofrem quando resistem à flexão da chapa em balanço.

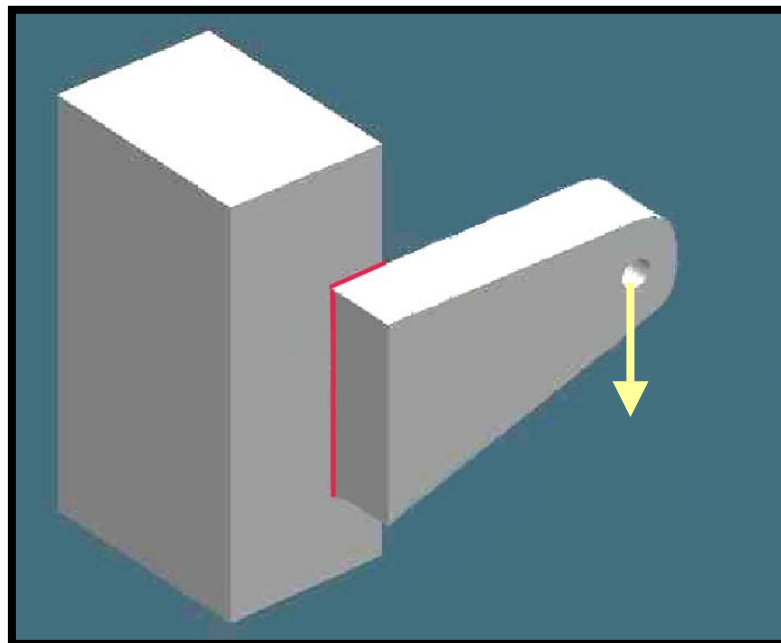


Figura 5 Filetes de Solda submetidos a Esforços de Cisalhamento devido a Torção e Força Cortante

O mesmo tipo de solicitação é mostrado na figura 6. Nessa figura, o ponto G representa o centro de gravidade das soldas. Em torno desse centro os filetes sofrerão o torque causado pela força de 20 kN. Em outras palavras, a força de flexão na chapa tende a girar o conjunto de filetes em torno do centro G. O centro funciona como o local onde poderia ser aplicada uma carga e um torque, iguais e opostos aos esforços causados pela carga, para equilibrar a chapa.

Os pontos A, B e C são os pontos mais distantes do centro G. Supondo que a tensão de cisalhamento devida a força cortante seja uniformemente distribuída, os pontos mais distantes deverão ser os principais candidatos a suportar as maiores tensões combinadas, já que a tensão de cisalhamento devida ao torque depende da distância do ponto ao centro G. As tensões devidas ao torque têm a direção perpendicular ao raio do ponto onde estão sendo calculadas, ou seja, perpendicular a reta que liga o ponto e o centro de gravidade. O ponto B, embora não esteja no extremo dos filetes como os pontos A e C, também é um possível ponto de máximo porque a tensão máxima depende da combinação das tensões e, nesse ponto, essas poderiam se somar, dependendo da direção das tensões.

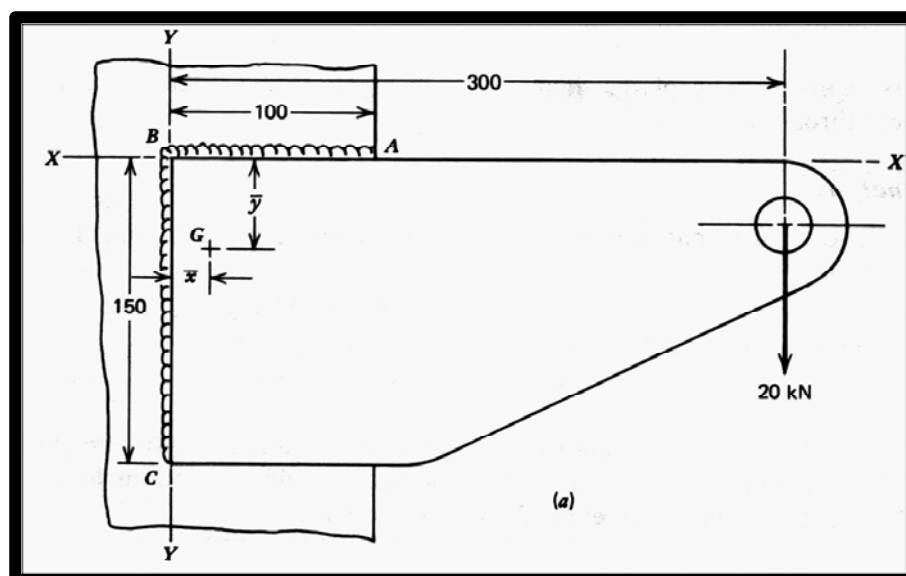


Figura 6 Filetes de Solda submetidos a Esforços de Cisalhamento devido a Torção e Força Cortante

A figura 7 mostra o detalhe das tensões no ponto A e C. Em vermelho estão mostradas as tensões devidas a força cortante. Em azul, inclinadas, estão mostradas as tensões devidas a torção.

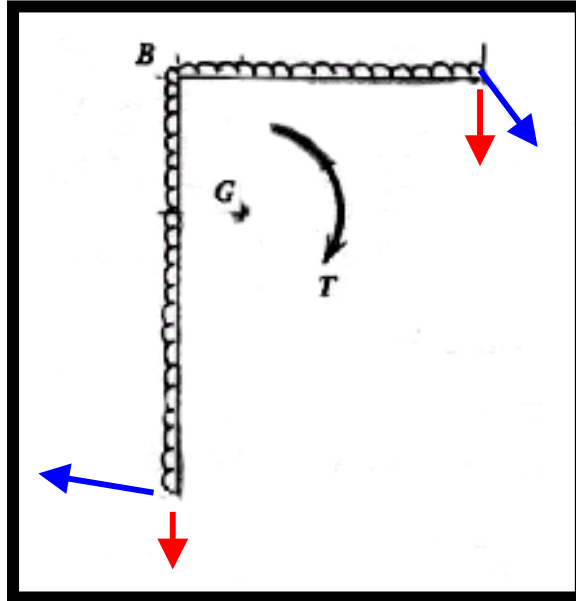


Figura 7 Tensões nos Filetes de Solda: Cisalhamento devido a Torção é mostrado em azul e devido à Força Cortante é mostrado em vermelho

A combinação de tensões em cada ponto pode ser representada pela equação a seguir, onde cada termo deve ser considerado na direção que está atuando, não sendo uma soma algébrica simples, mas uma combinação vetorial. Isso pode ferir o conceito de tensão, mas é adequado pelo procedimento adotado.

$$\tau = \frac{T.r}{J} + \frac{F}{A} \quad (2)$$

A tensão calculada segundo a fórmula 2 deve ser comparada com a resistência ao cisalhamento adequada (escoamento ou ruptura). A área A e o momento polar de inércia J devem ser calculados levando em conta a espessura t , da mesma forma que descrito no item 3.2 para outros tipos de arranjos de soldagem.

3.4. Junções Especiais - Flexão nas Soldas

O arranjo mostrado na figura 8 representa o tipo de soldagem no qual a solda sofre uma composição entre a tensão de flexão e a de cisalhamento devido à força cortante. Da mesma forma que para o caso discutido no item 3.3, a tensão resultante é uma combinação dessas tensões, agora conforme a equação 3.

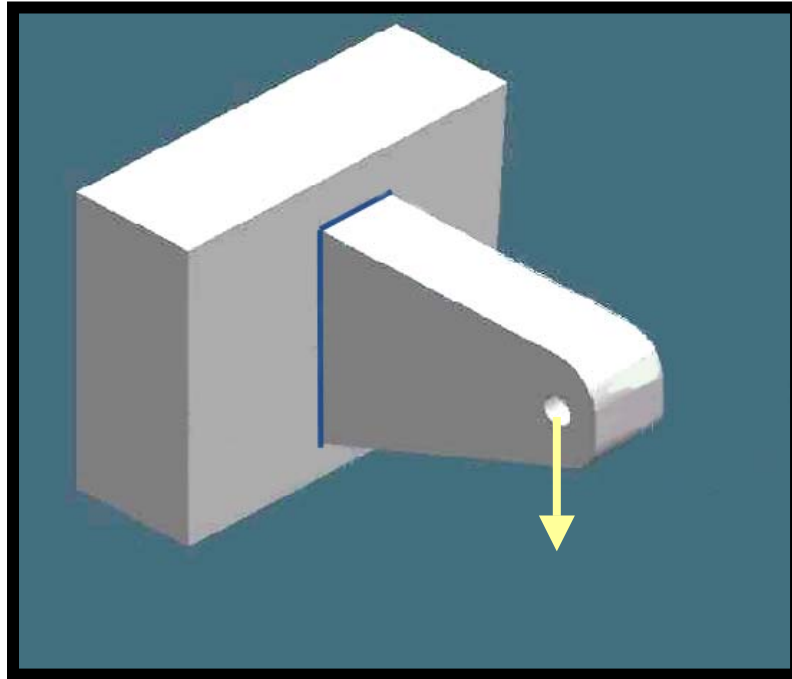


Figura 8 Filetes de Solda submetidos à Tensão Normal de Flexão e a Tensão de Cisalhamento devida a Força Cortante

$$\tau = \frac{M.c}{I} + \frac{F}{A} \quad (3)$$

Embora a tensão de flexão seja um tipo de tensão normal, que deveria ser comparada à tensão de escoamento ou ao limite de resistência à tração, o procedimento requer que ambas sejam combinadas e a resultante seja considerada como tensão de cisalhamento agindo na seção definida pela espessura t e pelo comprimento do filete. Novamente, o cisalhamento é suposto uniformemente distribuído na solda e deve ser combinado com a tensão de flexão máxima.

3.5. Cálculo dos Momentos de Inércia

A figura 9 mostra um filete de solda e os eixos $X' Y'$, que passam por seu centro de gravidade, e os eixos $X Y$, que estão deslocados do CG. Para calcular os momentos de inércia em relação ao sistema de coordenadas XY é necessário utilizar o teorema dos eixos paralelos. Note-se que a espessura utilizada para o filete é t , o que é coerente com o procedimento normalizado, e o comprimento do filete é L .

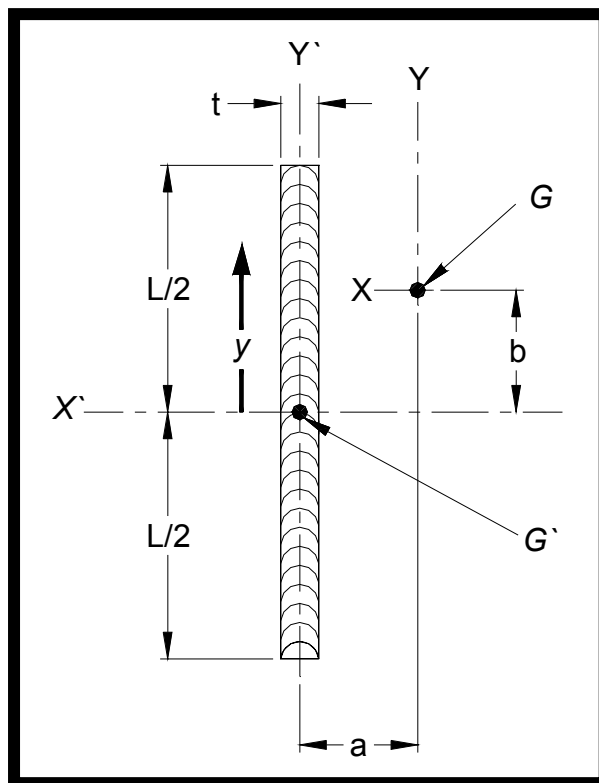


Figura 9 Filete de Solda, seus Eixos Principais e um Sistema de Eixos Paralelo

Os valores dos momentos de inércia de área em relação aos novos eixos podem ser calculados pelas seguintes equações:

$$I_{Y'} = 0 \quad (4.a)$$

$$I_{X'} = \int y^2 dA = 2 \cdot \int_0^{L/2} y^2 \cdot t \cdot dy = \frac{L^3 \cdot t}{12} \quad (4.b)$$

$$I_X = I_{X'} + A.b^2 = \frac{L^3.t}{12} + L.t.b^2 \quad (4.c)$$

$$I_Y = I_{Y'} + A.a^2 = L.t.a^2 \quad (4.d)$$

O momento polar de inércia, utilizado no cálculo das tensões devidas a torção, é dado por:

$$J = I_X + I_Y = \frac{L^3.t}{12} + L.t.(a^2 + b^2) \quad (5)$$

4. Carregamento Variável

Junções soldadas sofrendo carregamento variável podem falhar por fadiga. A falta uma sistemática de cálculo que melhor represente o que realmente acontece na solda e a impossibilidade de incluir os muitos fatores que influenciam na qualidade da junção soldada, fazem com que os coeficientes de segurança para estruturas soldadas, em especial as que sofrem carregamento variável, sejam elevados. Alguns códigos recomendam também fatores para levar em conta o carregamento variável. Normalmente, esses fatores aparecem na forma de um fator de intensificação de tensões na fadiga k_f . A tabela 1 mostra os valores para os principais tipos de junções soldadas. O procedimento para dimensionamento é semelhante ao utilizado para qualquer outro elemento sujeito a carregamento variável, mas com coeficientes de segurança maiores do que os usuais.

Tipo de Solda	k_f
Solda de Topo com reforço	1,2
Cordões Transversais - inclui flexão e torção	1,5
Extremidade de Cordões Paralelos	2,7
Soldas de Topo e em T com cantos agudos	2,0

5. Conclusões

O processo de soldagem em estruturas requer a utilização de cuidados que outros processos de união de peças não necessitam. Em especial, devido ao aquecimento necessário para que a soldagem se processe, é muito importante o cuidado com a execução dos passes, controle de temperatura e da zona afetada pelo calor. Devido às incertezas presentes, maiores coeficientes de segurança devem ser utilizados do que outras aplicações mais comuns.

O dimensionamento das soldas é feito levando-se em conta a tensão de cisalhamento e a área definida pela espessura t , que pode ser calculada como sendo cerca de 70% da medida da perna da solda em filetes comuns. Essa tensão deve ser comparada com o limite de resistência ao escoamento ou a tração, dependendo do tipo de falha que se deseja evitar.

Para carregamentos variáveis, fatores de intensificação de tensão e conceitos de dimensionamento à fadiga devem ser levados em conta. Nesse caso, coeficientes de segurança ainda maiores deveriam ser empregados.

A soldagem é um método de união de baixo custo, simples, extremamente versátil, mas que requer cuidados e pode causar distorção da estrutura. Tensões residuais também podem surgir devido ao processo e um alívio de tensões pode ser necessário. Quando os cuidados necessários no processo são tomados e os conceitos adequados de projeto são levados em conta, a soldagem apresenta-se como uma alternativa viável e segura para a conexão de elementos estruturais metálicos.

6. Referência Bibliográfica

A maioria dos conceitos aqui descritos, bem como parte das figuras, foram extraídos do livro a seguir, embora estejam presentes na maioria dos textos de Elementos de Máquinas.

JUVINALL, R. C. & MARSHEK, K. M. *Fundamentals of Machine Component Design*. Ed. John Wiley & Sons. New York, 1991. 2^a ed.