

4

Métodos de Dimensionamento da Solda a Partir do Estado de Tensões Nas Chapas Adjacentes

Para o dimensionamento de cordões de solda, os métodos clássicos baseiam-se em diversas hipóteses simplificadoras. Estas são importantes devido ao elevado grau de complexidade na avaliação das propriedades do material dos elementos que compõem a junta e da real distribuição de tensões ao longo cordão, principalmente devido à dificuldade de se estabelecer os carregamentos sob as quais a junta soldada é submetida. Com isso, pode-se obter o dimensionamento do cordão de solda acima do necessário.

Com o objetivo de alcançar-se possíveis melhorias na metodologia clássica mostrada no capítulo anterior, e visando remover a dificuldade de que o dimensionamento só é possível quando os esforços atuantes nos cordões são conhecidos, propõe-se, neste capítulo, uma metodologia numérica cuja descrição é apresentada a seguir. Com ela, a complexidade do carregamento que uma determinada junta pode apresentar, quanto à sua importância na transferência de carga, não representa dificuldade no dimensionamento.

Esta limitação de determinação do esforço é suprida empregando-se a solução pelo Método dos Elementos Finitos (M.E.F.) de estruturas submetidas a carregamentos estáticos. A idéia central se baseia na investigação do estado de tensões obtido através do M.E.F. das chapas nas regiões próximas às juntas. Conhecidas as dimensões das seções envolvidas na junta, pode-se, através da imposição das condições de equilíbrio, estabelecer os esforços aos quais os cordões estão sendo submetidos. De uma forma geral o estado de tensões ao longo do comprimento das seções pode ser variável e a variação dos esforços ao longo dos cordões pode também ser avaliada. Para cada ponto ao longo do comprimento do cordão é determinada a espessura mínima admissível para a solda, de acordo com o critério de resistência adotado.

Neste capítulo desenvolvem-se expressões relativas às componentes do tensor das tensões, resultante da aplicação das condições de equilíbrio impostas no cordão de solda quando as placas são submetidas a carregamentos simples. Este método aplica-se às juntas do tipo “T” mais comumente encontrado nas situações práticas, com cordões de filete isósceles. Neste tipo de junta a chapa não interrompida junto à solda (aba) é fixada através de dois cordões à chapa de topo.

Nas seções a seguir são desenvolvidas técnicas para o dimensionamento a partir da avaliação das tensões em ambas as chapas.

4.1. Dimensionamento através das tensões na chapa de topo

Considerando-se uma junta T, conforme mostrado na Figura 4.1, as reações nos cordões de solda são estabelecidas através das relações de equilíbrio, integrando-se as componentes de tensões – admitidas uniformes - em uma seção da chapa de topo adjacente ao cordão da solda. Esta seção deve ser paralela à linha do cordão, afastada da junta a uma distância que permita obter-se valores representativos do estado de tensão não perturbados pela descontinuidade geométrica inerente à modelagem da junta, e que por outro lado, esteja próxima o suficiente de forma que represente adequadamente as solicitações no cordão. Para um carregamento na placa tem-se na seção adjacente tensões normais ou cisalhantes, mostradas na Figura 4.1. Nas seções seguintes são analisadas as reações no cordão devidas a cada uma das solicitações representadas por estes valores de tensão.

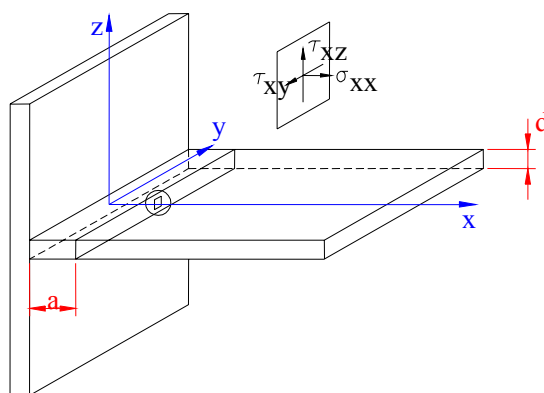


Figura 4.1 - Tensões na seção adjacente à junta na chapa de topo

4.1.1. Tensões Atuantes na Chapa de Topo

As tensões atuantes na chapa de topo na seção paralela à junta são, de acordo com a Figura 4.1: tensões normais perpendiculares à junta e tensões cisalhantes transversais em relação aos eixos y e z . As tensões normais obtidas em um plano paralelo, a uma distância a da junta, podem ser classificadas em:

- Membrana: $\sigma_{xm}(y,z)$ - parcela constante ao longo da espessura;
- Flexão: $\sigma_{xf}(y,z)$ - parcela variável ao longo da espessura

A parcela de membrana $\sigma_{x0}(y,z)$, considerada constante ao longo de z , podendo no entanto variar ao longo da largura da junta. Por outro lado a parcela de flexão é variável com a coordenada z . Considerando-se a chapa como uma placa fina, esta é uma hipótese simplificadora adequada, sendo $\sigma_{x1}(y)$ o valor da parcela de flexão. Na Figura 4.2 estas duas parcelas de tensão normal, em uma seção adjacente à junta, são apresentadas:

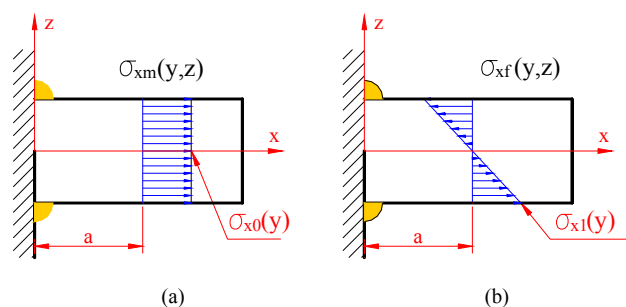


Figura 4.2 - Tensões normais na seção adjacente à junta. (a) Parcela de Membrana; (b) Parcela de Flexão

A superposição destas parcelas fornece a equação da tensão normal para qualquer ponto da seção paralela à junta:

$$\sigma_x(y,z) = \sigma_{x0}(y) + \frac{\sigma_{x1}(y)}{d/2} \cdot z \quad (4.1)$$

Da condição de equilíbrio, as tensões normais na solda, $\sigma_{R1s}(y)$ e $\sigma_{R1i}(y)$, podem ser obtidas em função da tensão de membrana $\sigma_{x0}(y)$, conforme está mostrado no diagrama de corpo livre, representado na Figura 4.3.

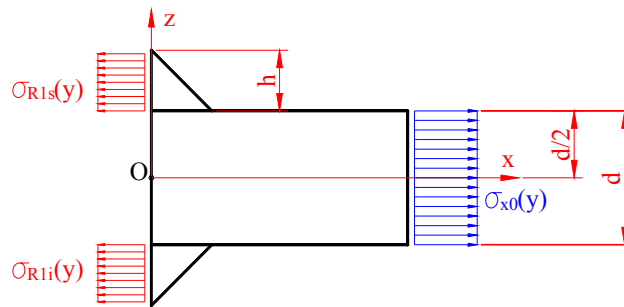


Figura 4.3 - Diagrama de corpo livre da junta submetida à tensão normal $\sigma_{x0}(y)$

Do equilíbrio de momentos em relação à origem “O”, tem-se que:

$$\left[\int_{d/2}^{d/2+h} \sigma_{R1s}(y) dz \right] \cdot \frac{d}{2} - \left[\int_{d/2}^{d/2+h} \sigma_{R1i}(y) dz \right] \cdot \frac{d}{2} = 0, \text{ o que resulta em:}$$

$$\sigma_{R1s}(y) = \sigma_{R1i}(y) = \sigma_{R1}(y) \quad (4.2)$$

Por outro lado, do equilíbrio de esforços na direção do eixo x, tem-se que $\Sigma F_x = 0$, ou ainda,

$$\left[\int_{-d/2}^{d/2} \sigma_{x0}(y) dz \right] - 2 \cdot \left[\int_{d/2}^{d/2+h} \sigma_{R1}(y) dz \right] = 0, \text{ o que resulta em:}$$

$$\sigma_{R1}(y) = \frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2 \cdot h} \quad (4.3)$$

A tensão de flexão $\sigma_{x1}(y)$ também é obtida dos vetores de reação nas projeções da garganta nas arestas verticais dos cordões de solda, como no diagrama de corpo livre representado na Figura 4.4.

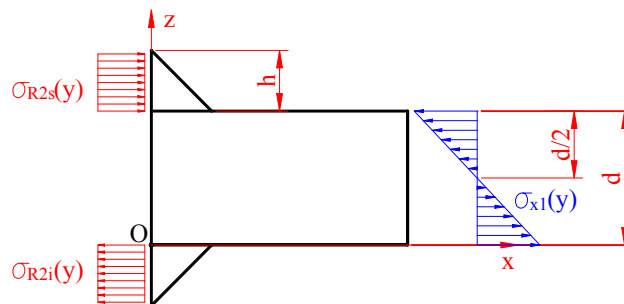


Figura 4.4 - Diagrama de corpo livre da junta submetida à tensão normal $\sigma_{x1}(y)$

Do equilíbrio de esforços na direção do eixo x

$$-\int_{d/2}^{d/2+h} \sigma_{R2s}(y) dz + \int_{-d/2}^{d/2} \frac{\sigma_{x1}(y)}{d/2} \cdot z dz + \int_{d/2}^{d/2+h} \sigma_{R2i}(y) dz = 0, \text{ o que resulta em:}$$

$$\sigma_{R2s}(y) = \sigma_{R2i}(y) = \sigma_{R2}(y) \quad (4.4)$$

Por outro lado da condição do equilíbrio de momentos em relação ao ponto “O” resulta

$$\int_0^d \frac{\sigma_{x1}(y)}{d/2} \cdot z^2 dz - \left(\int_d^{d+h} \sigma_{R2}(y) dz \right) \cdot d = 0, \text{ o que resulta em:}$$

$$\sigma_{R2}(y) = \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6 \cdot h} \quad (4.5)$$

Da mesma forma que para as tensões normais, admitindo-se também a tensão cisalhante $\tau_{xz}(y)$ constante ao longo da espessura da chapa, temos o diagrama de corpo livre representado na Figura 4.5.

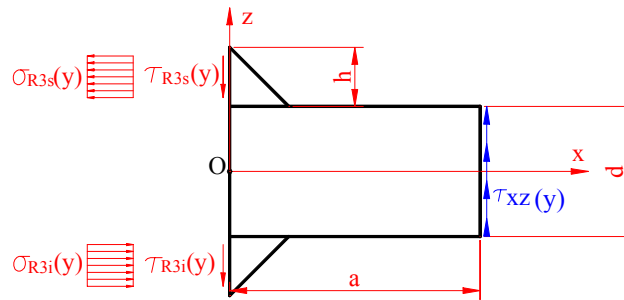


Figura 4.5– Diagrama de corpo livre da junta submetida à tensão cisalhante τ_{zx}

Considerando-se a condição de simetria, e admitindo-se $d \gg h$, tem-se que:

$$\tau_{R3s}(y) = \tau_{R3i}(y) = \tau_{R3}(y) \quad (4.6)$$

Do equilíbrio de esforços na direção do eixo x resulta:

$$\left[\int_{d/2}^{d/2+h} \sigma_{R3s}(y) dz \right] - \left[\int_{d/2}^{d/2+h} \sigma_{R3i}(y) dz \right] = 0$$

$$\sigma_{R3s}(y) = \sigma_{R3i}(y) = \sigma_{R3}(y) \quad (4.7)$$

Por outro lado, da condição do equilíbrio de esforços na direção do eixo z, tem-se,

$$\left[\int_{-d/2}^{d/2} \tau_{xz}(y) dz \right] - 2 \cdot \left[\int_{d/2}^{d/2+h} \tau_{R3}(y) dz \right] = 0, \text{ o que resulta em,}$$

$$\tau_{R3}(y) = \frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2 \cdot h} \quad (4.8)$$

Finalmente, da condição de equilíbrio de momentos em relação à origem O dos eixos coordenados,

$$\left[\int_{d/2}^{d/2+h} \sigma_{R3s}(y) dz \right] \cdot \frac{d}{2} + \left[\int_{d/2}^{d/2+h} \sigma_{R3i}(y) dz \right] \cdot \frac{d}{2} - \left[\int_{-d/2}^{d/2} \tau_{xz}(y) dz \right] \cdot a = 0, \text{ o que resulta em:}$$

$$\sigma_{R3s}(y) \cdot h \cdot \frac{d}{2} + \sigma_{R3i}(y) \cdot h \cdot \frac{d}{2} - \tau_{xz}(y) \cdot d \cdot a = 0 \quad (4.9)$$

Substituindo-se o resultado em (4.7) na equação (4.9), resulta:

$$\sigma_{R3}(y) = \frac{\tau_{xz}(y) \cdot a}{h} \quad (4.10)$$

Agora, considerando-se a tensão de cisalhamento transversa à placa no plano paralelo à junta na direção y, $\tau_{xy}(y)$, esta é considerada constante ao longo da espessura da chapa, e é obtida da condição de equilíbrio pelos vetores reação nas projeções da garganta nas arestas verticais dos cordões de solda, conforme está mostrado no diagrama de corpo livre, na Figura 4.6.

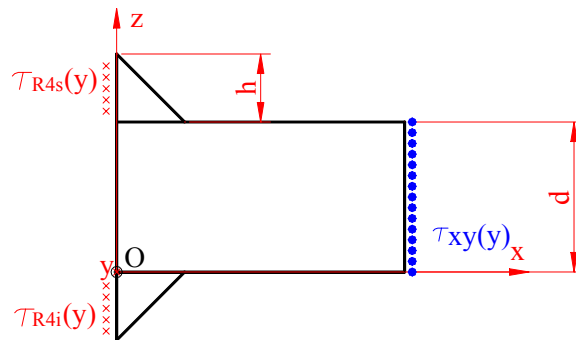


Figura 4.6 – Diagrama de corpo livre da junta submetida à tensão cisalhante τ_{xy}

Estabelecendo-se o equilíbrio dos momentos em relação à origem O:

$$\left[\int_{d/2}^{d/2+h} \tau_{R4s}(y) dz \right] \cdot d - \left[\int_{-d/2}^{d/2} \tau_{xy}(y) dz \right] \cdot \frac{d}{2} = 0, \text{ o que resulta em:}$$

$$\tau_{R4s}(y) = \frac{\tau_{xy}(y) \cdot d}{2 \cdot h} \quad (4.11)$$

E da condição de equilíbrio dos esforços na direção do eixo y, tem-se:

$$\left[\int_{-d/2}^{d/2} \tau_{xy}(y) dz \right] - \left[\int_{d/2}^{d/2+h} \tau_{R4s}(y) dz \right] - \left[\int_{d/2}^{d/2+h} \tau_{R4i}(y) dz \right] = 0, \text{ ou ainda:}$$

$$\tau_{xy}(y) \cdot d - \tau_{R4s}(y) \cdot h - \tau_{R4i}(y) \cdot h = 0 \quad (4.12)$$

Levando-se na equação (4.12) o resultado (4.11), temos:

$$\tau_{xy}(y) \cdot d - \frac{\tau_{xy}(y) \cdot d}{2 \cdot h} \cdot h - \tau_{R4i}(y) \cdot h = 0, \text{ ou ainda:}$$

$$\tau_{R4i}(y) = \frac{\tau_{xy}(y) \cdot d}{2 \cdot h} \quad (4.13)$$

Assim, tem-se:

$$\tau_{R4s}(y) = \tau_{R4i}(y) = \tau_{R4}(y) = \frac{\tau_{xy}(y) \cdot d}{2 \cdot h} \quad (4.14)$$

4.1.2.

Superposição dos Estados de Tensões e Dimensionamento do Cordão de Solda

Da combinação dos efeitos de membrana, flexão e cisalhamento, descritos na seção 4.1.1, determinam-se as componentes do estado de tensões nos cordões de solda superior e inferior. Assim, para o cordão superior, tem-se:

$$\sigma_{xzs}(y) = \sigma_{R1}(y) - \sigma_{R2}(y) - \sigma_{R3}(y)$$

$$\tau_{xys}(y) = \tau_{R4}(y) \quad (4.15)$$

$$\tau_{xzs}(y) = \tau_{R3}(y)$$

onde considerando-se os resultados obtidos nas equações (4.3), (4.5), (4.8), (4.10) e (4.14) resultam, em função das componentes de tensão na placa de topo, $\sigma_{x0}(y)$, $\sigma_{x1}(y)$, $\tau_{xy}(y)$ e $\tau_{xz}(y)$,

$$\sigma_{xzs}(y) = \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2} - \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6} - \tau_{xz}(y) \cdot a \right]$$

$$\tau_{xys}(y) = \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{\tau_{xy}(y) \cdot d}{2} \right] \quad (4.16)$$

$$\tau_{xzs}(y) = \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2} \right]$$

Similarmente, para o cordão inferior, tem-se,

$$\sigma_{xzi}(y) = \sigma_{R1}(y) + \sigma_{R2}(y) + \sigma_{R3}(y)$$

$$\tau_{xyi}(y) = \tau_{R4}(y) \quad (4.17)$$

$$\tau_{xzi}(y) = \tau_{R3}(y)$$

onde substituindo-se os resultados às equações (4.3), (4.5), (4.8), (4.10) e (4.14) resultam,

$$\begin{aligned}\sigma_{xxi}(y) &= \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2} + \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6} + \tau_{xz}(y) \cdot a \right] \\ \tau_{xyi}(y) &= \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{\tau_{xy}(y) \cdot d}{2} \right] \\ \tau_{xzi}(y) &= \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2} \right]\end{aligned}\quad (4.18)$$

As equações (4.17) e (4.18) representam os estados de tensão na face dos cordões de solda em contato com a chapa da aba, em função do estado de tensões em uma seção da chapa de topo adjacente ao cordão da solda. Para o dimensionamento da solda, no entanto, há a necessidade de avaliar-se o estado de tensões no plano da garganta, e então aplicar-se o critério clássico de resistência. Admitindo-se que as tensões são constantes ao longo da aresta vertical dos cordões tem-se que:

$$\begin{aligned}R_X^S(y) &= \sigma_{xss}(y) \cdot h & R_X^I(y) &= \sigma_{xxi}(y) \cdot h \\ R_Y^S(y) &= \sigma_{xys}(y) \cdot h & R_Y^I(y) &= \sigma_{xyi}(y) \cdot h \\ R_Z^S(y) &= \sigma_{xzs}(y) \cdot h & R_Z^I(y) &= \sigma_{xzi}(y) \cdot h\end{aligned}\quad (4.19) \quad (4.20)$$

onde $R_X^S(y)$, $R_Y^S(y)$ e $R_Z^S(y)$; e $R_X^I(y)$, $R_Y^I(y)$ e $R_Z^I(y)$ são os esforços na face vertical do cordão superior e inferior, respectivamente. Analogamente para as seções das gargantas tem-se:

$$\begin{aligned}R_N^S(y) &= \sigma_{ns}(y) \cdot ag & R_N^I(y) &= \sigma_{ni}(y) \cdot ag \\ R_T^S(y) &= \sigma_{ts}(y) \cdot ag & R_T^I(y) &= \sigma_{ti}(y) \cdot ag \\ R_L^S(y) &= \sigma_{ls}(y) \cdot ag & R_L^I(y) &= \sigma_{li}(y) \cdot ag\end{aligned}\quad (4.21) \quad (4.22)$$

onde $R_N^S(y)$, $R_T^S(y)$ e $R_L^S(y)$; e $R_N^I(y)$, $R_T^I(y)$ e $R_L^I(y)$ são os esforços na garganta do cordão superior e inferior, respectivamente, e ag corresponde à largura da seção da garganta.

Da condição de equilíbrio, considerando-se os esforços na face vertical do cordão e no plano da garganta, estabelecem-se as componentes normais e de cisalhamento nos cordões superior e inferior, respectivamente [1]:

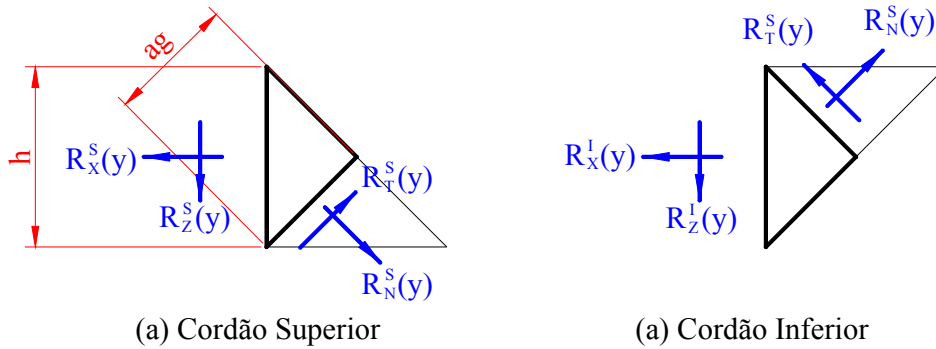


Figura 4.7 – Diagrama de Corpo Livre: (a) Cordão Superior e (b) Cordão Inferior

$$R_N^s(y) = [R_X^s(y) - R_Z^s(y)] \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad R_N^i(y) = [R_X^i(y) + R_Z^i(y)] \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$R_T^s(y) = [R_X^s(y) + R_Z^s(y)] \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad R_T^i(y) = [R_Z^i(y) - R_X^i(y)] \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (4.23) \quad (4.24)$$

$$R_L^s(y) = R_Y^s(y)$$

$$R_L^i(y) = R_Y^i(y)$$

Para o cordão a ser dimensionado de arestas iguais tem-se: $ag = h\sqrt{2}/2$. Substituindo-se as equações (4.19) a (4.22) nas equações (4.23) e (4.24), estas podem ser reescritas na forma:

$$\sigma_n^s(y) = (\sigma_{xzs} - \tau_{xzs})$$

$$\sigma_n^i(y) = (\sigma_{xzi} + \tau_{xzi})$$

$$\tau_t^s(y) = (\sigma_{xzs} + \tau_{xzs}) \quad (4.25)$$

$$\tau_t^i(y) = (\tau_{xzi} - \sigma_{xzi}) \quad (4.26)$$

$$\tau_1^s(y) = \sqrt{2} \cdot \tau_{xys}$$

$$\tau_1^i(y) = \sqrt{2} \cdot \tau_{xyi}$$

Utilizando-se o critério estabelecido no Capítulo 3 para o dimensionamento do cordão, utilizando-se os resultados das equações (4.26) e (4.27) na equação (3.11) resultam em,

(a) cordão superior:

$$\sqrt{(\sigma_{xzs}(y) - \tau_{xzs}(y))^2 + k_w \left[(\sigma_{xzs}(y) + \tau_{xzs}(y))^2 + (\sqrt{2} \cdot \tau_{xys}(y))^2 \right]} \leq \frac{1}{\beta} \cdot \frac{S_y}{CS} \quad (4.27)$$

(b) cordão inferior:

$$\sqrt{(\sigma_{xxi}(y) + \tau_{xzi}(y))^2 + k_w \left[(\tau_{xzi}(y) - \sigma_{xxi}(y))^2 + (\sqrt{2} \cdot \tau_{xyi}(y))^2 \right]} \leq \frac{1}{\beta} \cdot \frac{Sy}{CS} \quad (4.28)$$

Considera-se que o critério utilizado para o dimensionamento do cordão seja igual ao utilizado para o dimensionamento das chapas de base, i.e. fator $k_w=3$, e, portanto, tomando-se os resultados às equações (4.16) nas equações (4.27) obtém-se para o cordão superior,

$$\begin{aligned} \frac{Sy}{CS} \geq & \left\{ \left[\frac{1}{h_s} \cdot \left(\frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2} - \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6} - \tau_{xz}(y) \cdot a - \frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 + \right. \\ & + 3 \cdot \left[\frac{1}{h_s} \cdot \left(\frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2} - \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6} - \tau_{xz}(y) \cdot a + \frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 + \\ & \left. + 3 \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{h_s} \cdot \left(\frac{\tau_{xy}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \cdot \beta \end{aligned} \quad (4.29)$$

que permite estabelecer a altura nominal mínima admissível h_s para o cordão superior:

$$\begin{aligned} h_s = & \left\{ \left[\left(\frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2} - \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6} - \tau_{xz}(y) \cdot a - \frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 + \right. \\ & + 3 \cdot \left[\left(\frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2} - \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6} - \tau_{xz}(y) \cdot a + \frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 \\ & \left. + 3 \cdot \left[\sqrt{2} \cdot \left(\frac{\tau_{xy}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \cdot \frac{CS}{Sy} \cdot \beta \end{aligned} \quad (4.30)$$

E, analogamente, para o cordão inferior temos,

$$\begin{aligned} \frac{Sy}{CS} \geq & \left\{ \left[\frac{1}{h_i} \cdot \left(\frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2} - \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6} - \tau_{xz}(y) \cdot a + \frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 + \right. \\ & + 3 \cdot \left[\frac{1}{h_i} \cdot \left(-\frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2} + \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6} + \tau_{xz}(y) \cdot a + \frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 + \\ & \left. + 3 \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{h_i} \cdot \left(\frac{\tau_{xy}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \cdot \beta \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$+ 3 \cdot \left[\frac{\sqrt{2}}{h_i} \cdot \left(\frac{\tau_{xy}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 \Bigg\}^{1/2} \cdot \beta$$

que resulta para a altura nominal do cordão h_i :

$$h_i = \left\{ \left[\left(\frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2} - \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6} - \tau_{xz}(y) \cdot a + \frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 + \right. \\ \left. + 3 \cdot \left[\left(-\frac{\sigma_{x0}(y) \cdot d}{2} + \frac{\sigma_{x1}(y) \cdot d}{6} + \tau_{xz}(y) \cdot a + \frac{\tau_{xz}(y) \cdot d}{2} \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \cdot \frac{CS}{S_y} \cdot \beta \quad (4.32)$$

Das equações acima determinam-se as alturas mínimas dos cordões superior e inferior, para o dimensionamento considerando-se as tensões nas chapas de topo. Na seção que se segue considera-se o dimensionamento do cordão avaliando-se o estado de tensões na chapa da aba.

4.2. Dimensionamento Considerando as Tensões na Chapa de Aba

Analogamente ao procedimento utilizado na seção anterior, consideram-se agora as tensões na chapa de aba, conforme a Figura 4.8.

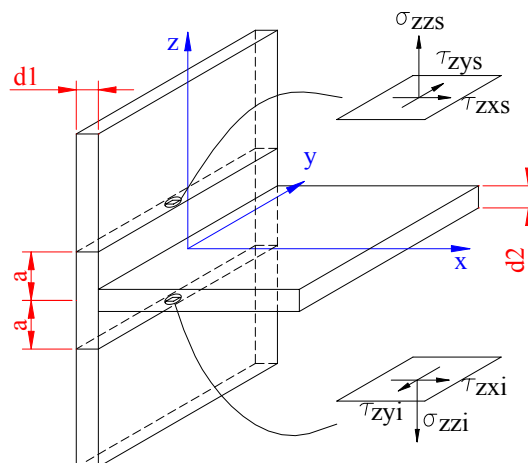


Figura 4.8 - Tensões na seção adjacente à junta na chapa de aba

4.2.1. Estado de Tensões nas Faces Adjacentes à Junta

Como na situação descrita na seção 4.1.1 as tensões normais obtidas nos paralelos à chapa de topo são classificadas em:

- Membrana: $\sigma_{z0}(y,x)$ - parcela constante ao longo da espessura;
- Flexão: $\sigma_{z1}(y,x)$ - parcela variável ao longo da espessura

Expressas em função das coordenadas y e x , estas parcelas de tensão são utilizadas na obtenção dos vetores carregamento. $\sigma_{z0}(y)$ caracteriza o valor da tensão normal média ao longo da espessura e $\sigma_{z1}(y)$ corresponde ao valor máximo da parcela variável da tensão ao longo da espessura ajustada para uma distribuição linear. Na Figura 4.9 as duas seções consideradas adjacentes à junta são apresentadas:

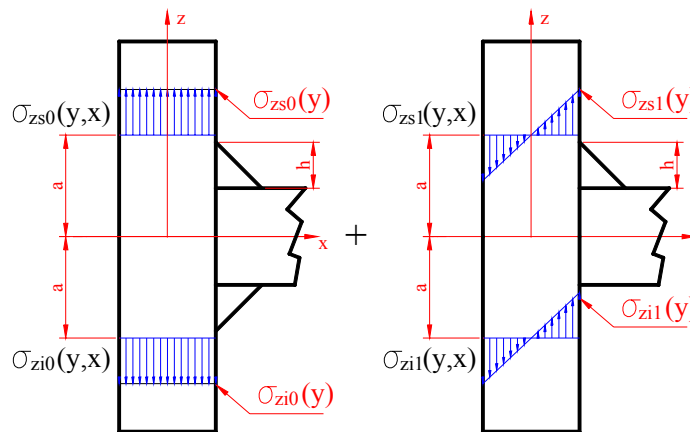


Figura 4.9- Tensões normais nas seções adjacentes à junta

Da condição de equilíbrio, as tensões normais na solda, $\sigma_{R1s}(y)$, $\sigma_{R1i}(y)$, $\tau_{R1s}(y)$ e $\tau_{R1i}(y)$, são obtidas em função das tensões de membrana $\sigma_{zs0}(y)$ e $\sigma_{zi0}(y)$, nas seções superior e inferior adjacentes à junta, respectivamente, conforme está mostrado no diagrama de corpo livre, representado na Figura 4.10.

Do equilíbrio de momentos em relação ao ponto “O”, tem-se:

$$\left[\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{R1s}(y) dz \right] - \left[\int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{R1i}(y) dz \right] = 0, \text{ o que resulta em:}$$

$$\sigma_{R1s}(y) = \sigma_{R1i}(y) = \sigma_{R1}(y) \quad (4.33)$$

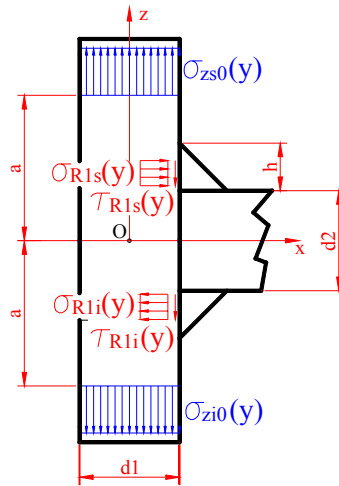


Figura 4.10- Diagrama de corpo livre da junta submetida às tensões normais $\sigma_{zs0}(y)$ e $\sigma_{zi0}(y)$

Por outro lado, da condição de equilíbrio dos esforços na direção do eixo z , resulta,

$$\left[\int_{-d_1/2}^{d_1/2} \sigma_{zs0}(y) dx \right] - \left[\int_{-d_1/2}^{d_1/2} \sigma_{zi0}(y) dx \right] - \left[\int_{d_2/2}^{d_2/2+h} \tau_{R1s}(y) dz \right] - \left[\int_{d_2/2}^{d_2/2+h} \tau_{R1i}(y) dz \right] = 0,$$

o que resulta em $\tau_{R1s}(y) = \tau_{R1i}(y) = \tau_{R1}(y)$, com $d_1 \ll d_2$, ou

$$\tau_{R1}(y) = \frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d_1}{2 \cdot h} \quad (4.34)$$

Finalmente, da condição de equilíbrio aos momentos em relação à origem O dos eixos coordenados,

$$\begin{aligned} & - \left[\int_{d_1/2}^{d_1/2+h} \sigma_{R1s}(y) dz \right] \cdot \frac{d_2}{2} - \left[\int_{d_1/2}^{d_1/2+h} \sigma_{R1i}(y) dz \right] \cdot \frac{d_2}{2} + \left[\int_{d_2/2}^{d_2/2+h} \tau_{R1s}(y) dz \right] \cdot \frac{d_1}{2} \\ & + \left[\int_{d_2/2}^{d_2/2+h} \tau_{R1i}(y) dz \right] \cdot \frac{d_1}{2} = 0, \text{ o que resulta:} \\ & - \sigma_{R1s}(y) \cdot h \cdot \frac{d_2}{2} - \sigma_{R1i}(y) \cdot h \cdot \frac{d_2}{2} + \tau_{R1s}(y) \cdot h \cdot \frac{d_1}{2} + \tau_{R1i}(y) \cdot h \cdot \frac{d_1}{2} = 0 \end{aligned} \quad (4.35)$$

Levando-se na equação (4.35) o resultado de (4.33) temos:

$$\sigma_{R1}(y) = \tau_{R1}(y) \cdot \frac{d_1}{d_2}, \text{ ou ainda,} \quad (4.36)$$

$$\sigma_{R1}(y) = \frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d_1^2}{2 \cdot h \cdot d_2} \quad (4.37)$$

A tensão de flexão definida por $\sigma_{zi}(y)$, é equilibrada pelos vetores de reação nas arestas verticais dos cordões de solda, como no diagrama de corpo livre representado na Figura 4.11.

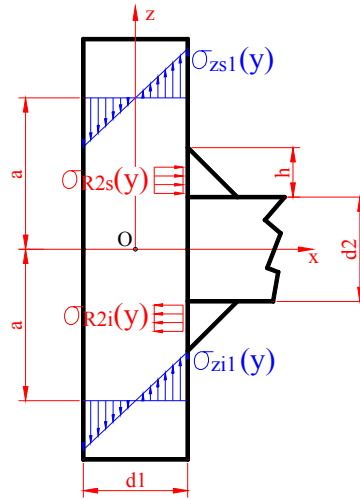


Figura 4.11 - Diagrama de corpo livre da junta submetida às tensões normais $\sigma_{zs1}(y)$ e $\sigma_{zi1}(y)$

Do equilíbrio de esforços na direção do eixo x ,

$$-\left[\int_{d2/2}^{d2/2+h} \sigma_{R2s}(y) dz \right] + \left[\int_{d2/2}^{d2/2+h} \sigma_{R2i}(y) dz \right] = 0, \text{ o que resulta em,}$$

$$\sigma_{R2s}(y) = \sigma_{R2i}(y) = \sigma_{R2}(y) \quad (4.38)$$

Por outro lado, estabelecendo a condição de equilíbrio nos momentos em relação à origem O resulta:

$$\left[\int_{d2/2}^{d2/2+h} \sigma_{R2s}(y) dz \right] \cdot \frac{d2}{2} + \left[\int_{d2/2}^{d2/2+h} \sigma_{R2i}(y) dz \right] \cdot \frac{d2}{2} - \left[\int_{-d1/2}^{d1/2} \frac{\sigma_{zs1}(y) \cdot x}{d1/2} dx \right] \cdot x -$$

$$\left[\int_{-d1/2}^{d1/2} \frac{\sigma_{zi1}(y) \cdot x}{d1/2} dx \right] \cdot x = 0, \text{ ou ainda,}$$

$$\sigma_{R2s}(y) \cdot h \cdot \frac{d2}{2} + \sigma_{R2i}(y) \cdot h \cdot \frac{d2}{2} - \frac{\sigma_{zs1}(y) \cdot d1^2}{6} - \frac{\sigma_{zi1}(y) \cdot d1^2}{6} = 0 \quad (4.39)$$

Combinando-se o resultado em (4.38) na equação (4.39), resulta:

$$\sigma_{R2}(y) = \frac{[\sigma_{zs1}(y) + \sigma_{zi1}(y)] \cdot d1^2}{6 \cdot h \cdot d2} \quad (4.40)$$

Da mesma forma que para as tensões normais, as tensões de cisalhamento $\tau_{zxs}(y)$ e $\tau_{zxi}(y)$ constantes ao longo da espessura da chapa nas seções superior e

inferior, respectivamente, podem ser obtidas conforme está mostrado no diagrama de corpo livre representado na Figura 4.12:

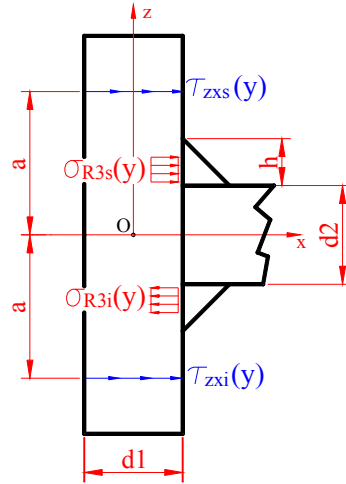


Figura 4.12 - Diagrama de corpo livre da junta submetida às tensões cisalhantes $\tau_{zxs}(y)$ e $\tau_{zxi}(y)$

Da condição de equilíbrio de esforços na direção do eixo x resulta,

$$\left[\int_{d2/2}^{d2/2+h} \sigma_{R3s}(y) dz \right] - \left[\int_{d2/2}^{d2/2+h} \sigma_{R3i}(y) dz \right] - \left[\int_{-d1/2}^{d1/2} \tau_{zxs}(y) dx \right] + \left[\int_{-d1/2}^{d1/2} \tau_{zxi}(y) dx \right] = 0, \text{ ou}$$

$$\text{ainda, } \sigma_{R3s}(y) - \sigma_{R3i}(y) = \frac{[\tau_{zxs}(y) - \tau_{zxi}(y)] \cdot d1}{h} \quad (4.41)$$

Por outro lado, da condição de equilíbrio nos momentos em relação à origem O, tem-se que:

$$-\left[\int_{d2/2}^{d2/2+h} \sigma_{R3s}(y) dz \right] \cdot \frac{d2}{2} - \left[\int_{d2/2}^{d2/2+h} \sigma_{R3i}(y) dz \right] \cdot \frac{d2}{2} + \left[\int_{-d1/2}^{d1/2} \tau_{zxi}(y) dx \right] \cdot a + \left[\int_{-d1/2}^{d1/2} \tau_{zxs}(y) dx \right] \cdot a = 0, \text{ o que resulta em:}$$

$$\sigma_{R3s}(y) + \sigma_{R3i}(y) = \frac{[\tau_{zxs}(y) + \tau_{zxi}(y)] \cdot d1 \cdot a \cdot 2}{d2 \cdot h} \quad (4.42)$$

Combinando-se o resultado em (4.41) na equação (4.42), resulta:

$$\sigma_{R3s}(y) = \frac{[\tau_{zxs}(y) - \tau_{zxi}(y)] \cdot d1}{2 \cdot h} + \frac{[\tau_{zxs}(y) + \tau_{zxi}(y)] \cdot d1 \cdot a}{d2 \cdot h} \quad (4.43)$$

$$\sigma_{R3i}(y) = \frac{[\tau_{zxs}(y) + \tau_{zxi}(y)] \cdot d1 \cdot a}{d2 \cdot h} - \frac{[\tau_{zxs}(y) - \tau_{zxi}(y)] \cdot d1}{2 \cdot h} \quad (4.44)$$

Agora, considerando-se as tensões de cisalhamento $\tau_{zys}(y)$ e $\tau_{zyi}(y)$, transversas à placa no plano paralelo à junta na direção y , consideradas constantes ao longo da espessura da chapa, como no diagrama de corpo livre, na Figura 4.13:

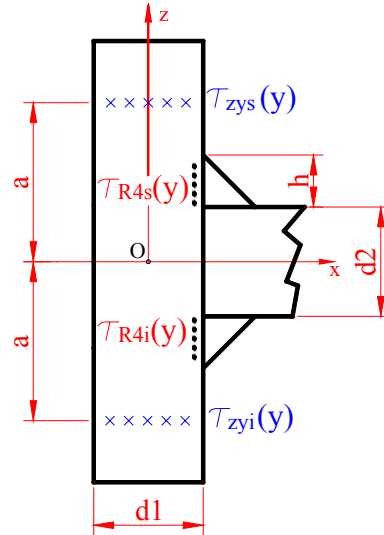


Figura 4.13 - Diagrama de corpo livre da junta submetida às tensões cisalhantes $\tau_{zys}(y)$ e $\tau_{zyi}(y)$

Estabelecendo-se a condição de equilíbrio dos esforços na direção do eixo y , tem-se que:

$$-\left[\int_{d_2/2}^{d_2/2+h} \tau_{R4s}(y) dz\right] + \left[\int_{d_2/2}^{d_2/2+h} \tau_{R4i}(y) dz\right] + \left[\int_{-d_1/2}^{d_1/2} \tau_{zys}(y) dx\right] - \left[\int_{-d_1/2}^{d_1/2} \tau_{zyi}(y) dx\right] = 0$$

o que resulta em:

$$\tau_{R4s}(y) - \tau_{R4i}(y) = \frac{[\tau_{zys}(y) - \tau_{zyi}(y)] \cdot d_1}{h} \quad (4.45)$$

Por outro lado, da condição de equilíbrio aos momentos em relação à origem O , resulta:

$$-\left[\int_{-h/2}^{h/2} \tau_{R4s}(y) dz\right] \cdot \frac{d_2}{2} - \left[\int_{-h/2}^{h/2} \tau_{R4i}(y) dz\right] \cdot \frac{d_2}{2} = 0, \text{ ou ainda,}$$

$$\tau_{R4s}(y) = \tau_{R4i}(y) = \tau_{R4} \quad (4.46)$$

Combinando-se o resultado em (4.45) na equação (4.46), resulta:

$$\tau_{R4}(y) = \frac{[\tau_{zys}(y) + \tau_{zyi}(y)] \cdot d_1}{2 \cdot h} \quad (4.47)$$

4.2.2.

Superposição dos Estados de Tensões e Dimensionamento do Cordão de Solda

Da combinação dos efeitos de membrana, flexão e cisalhamento, descritos na seção 4.2.1, determinam-se as componentes do estado de tensões nos face vertical dos cordões de solda superior e inferior. Assim, para o cordão superior, tem-se:

$$\begin{aligned}\sigma_{xxs}(y) &= \sigma_{R1s}(y) + \sigma_{R2s}(y) - \sigma_{R3s}(y) \\ \tau_{xys}(y) &= \tau_{R4s}(y) \\ \tau_{xzs}(y) &= \tau_{R1s}(y)\end{aligned}\quad (4.48)$$

onde considerando-se os resultados obtidos às equações (4.34), (4.37), (4.40), (4.43) e (4.47), em (4.48), resultam, em função das componentes de tensão na placa de aba, $\sigma_{zs0}(y)$, $\sigma_{zi0}(y)$, $\sigma_{zs1}(y)$, $\sigma_{zi1}(y)$, $\tau_{zys}(y)$, $\tau_{zyi}(y)$, $\tau_{zxs}(y)$ e $\tau_{zxi}(y)$:

$$\begin{aligned}\sigma_{xxs}(y) &= \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1^2}{2 \cdot d2} + \frac{[\sigma_{zs1}(y) + \sigma_{zi1}(y)] \cdot d1^2}{6 \cdot d2} - \right. \\ &\quad \left. \frac{[\tau_{zxs}(y) - \tau_{zxi}(y)] \cdot d1}{2} - \frac{[\tau_{zxs}(y) + \tau_{zxi}(y)] \cdot d1 \cdot a}{d2} \right] \\ \tau_{xys}(y) &= \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{[\tau_{zys}(y) - \tau_{zyi}(y)] \cdot d1}{2} \right] \\ \tau_{xzs}(y) &= \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1}{2} \right]\end{aligned}\quad (4.49)$$

Similarmente, para o cordão inferior, tem-se:

$$\begin{aligned}\sigma_{xxi}(y) &= -\sigma_{R1i}(y) + \sigma_{R2i}(y) + \sigma_{R3i}(y) \\ \tau_{xyi}(y) &= \tau_{R4i}(y) \\ \tau_{xzi}(y) &= \tau_{R1i}(y)\end{aligned}\quad (4.50)$$

onde substituindo-se as equações (4.34), (4.37), (4.40), (4.44) e (4.47), em (4.50), resultam em:

$$\sigma_{xxi}(y) = \frac{1}{h} \cdot \left[-\frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1^2}{2 \cdot d2} - \frac{[\sigma_{zs1}(y) + \sigma_{zi1}(y)] \cdot d1^2}{6 \cdot d2} + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{[\tau_{zxs}(y) + \tau_{zxi}(y)] \cdot d1 \cdot a}{d2} - \frac{[\tau_{zxs}(y) - \tau_{zxi}(y)] \cdot d1}{2} \\
\tau_{xyi}(y) &= \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{[\tau_{zys}(y) - \tau_{zyi}(y)] \cdot d1}{2} \right] \\
\tau_{xzi}(y) &= \frac{1}{h} \cdot \left[\frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1}{2} \right]
\end{aligned} \tag{4.51}$$

Analogamente ao procedimento descrito na seção 4.1.2, as equações (4.49) e (4.51) representam os estados de tensões na face dos cordões de solda em contato com a chapa da aba, agora em função do estado de tensões nas seções superior e inferior da chapa de aba, adjacentes ao cordão de solda. Utilizam-se as relações obtidas das equações (4.25) e (4.26) para se estabelecer o estado de tensões no plano da garganta da solda em função das tensões na face. Através das tensões obtidas no plano da garganta do cordão de solda, podemos calcular, de acordo com o mesmo critério estabelecido pelo método do esforço total da junta, a altura do cordão de solda superior e inferior para cada posição ao longo do eixo longitudinal da junta.

Substituindo-se os resultados (4.49) em (4.27) e isolando o valor da altura do cordão superior, temos que:

$$\begin{aligned}
h_s &= \left\{ \left[\frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1^2}{2 \cdot d2} + \frac{[\sigma_{zsl}(y) + \sigma_{zil}(y)] \cdot d1^2}{6 \cdot d2} - \frac{[\tau_{zxs}(y) - \tau_{zxi}(y)] \cdot d1}{2} \right. \right. \\
& - \left. \frac{[\tau_{zxs}(y) + \tau_{zxi}(y)] \cdot d1 \cdot a}{d2} - \frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1}{2} \right]^2 + \left[\frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1^2}{2 \cdot d2} \right. \\
& + \left. \frac{[\sigma_{zsl}(y) + \sigma_{zil}(y)] \cdot d1^2}{6 \cdot d2} - \frac{[\tau_{zxs}(y) - \tau_{zxi}(y)] \cdot d1}{2} - \frac{[\tau_{zxs}(y) + \tau_{zxi}(y)] \cdot d1 \cdot a}{d2} \right]^2 \\
& \left. + \left[\frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1}{2} \right]^2 + 3 \cdot \left[\frac{[\tau_{zys}(y) - \tau_{zyi}(y)] \cdot d1}{2} + \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \cdot \beta \cdot \frac{CS}{Sy} \tag{4.52}
\end{aligned}$$

Substituindo-se a equação (4.51) em (4.28), e isolando o valor da altura do cordão inferior, analogamente ao cordão superior, temos que:

$$h_i = \left\{ \left[-\frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1^2}{2 \cdot d2} - \frac{[\sigma_{zsl}(y) + \sigma_{zil}(y)] \cdot d1^2}{6 \cdot d2} + \frac{[\tau_{zxs}(y) - \tau_{zxi}(y)] \cdot d1}{2} \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
& - \left[\frac{[\tau_{zxs}(y) + \tau_{zxi}(y)] \cdot d1 \cdot a}{d2} + \frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1}{2} \right]^2 + \left[- \frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1^2}{2 \cdot d2} \right. \\
& \left. - \frac{[\sigma_{zsl}(y) + \sigma_{zil}(y)] \cdot d1^2}{6 \cdot d2} + \frac{[\tau_{zxs}(y) - \tau_{zxi}(y)] \cdot d1}{2} - \frac{[\tau_{zxs}(y) + \tau_{zxi}(y)] \cdot d1 \cdot a}{d2} \right]^2 \\
& + \left[\frac{[\sigma_{zs0}(y) - \sigma_{zi0}(y)] \cdot d1}{2} \right]^2 + 3 \cdot \left[- \frac{[\tau_{zys}(y) + \tau_{zyi}(y)] \cdot d1}{2} \right]^2 \Bigg\}^{\frac{1}{2}} \cdot \beta \cdot \frac{CS}{Sy} \quad (4.53)
\end{aligned}$$

Das equações (4.52) e (4.53) acima determina-se a altura mínima requerida para cordões de solda (superior e inferior) ao longo do comprimento considerando-se as tensões nas chapas de aba. Para o dimensionamento do cordão adota-se, então, o maior valor das alturas mínimas do cordão de solda obtidos no dimensionamento considerando-se as tensões nas chapas de aba e de topo.

No Capítulo 5 a seguir, a implementação da metodologia proposta no presente capítulo é incorporada a um procedimento que possibilita o dimensionamento de cordões de solda a partir de resultados fornecidos pelo Método dos Elementos Finitos.