Estado duplo ou, Estado plano de tensões.

A tensão que atua em um ponto é função do plano pelo qual se faz o estudo. Esta afirmação pode ficar mais clara quando analisa, por exemplo, um ponto de uma barra submetida a uma força normal de tração.

Tome-se, por exemplo, a figura 1. Nela uma barra cilíndrica é tracionada por uma força normal N.

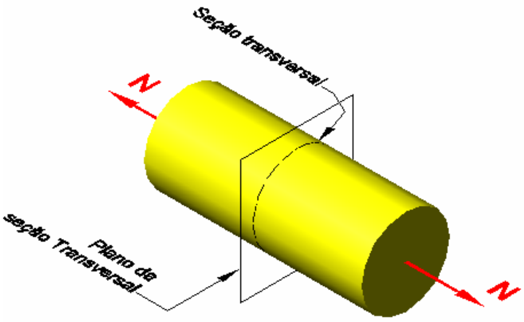


Figura 1- Barra cilíndrica tracionada por uma força N.

Ao se estudar um ponto da seção transversal indicada, encontra-se uma tensão normal de tração:

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (1)$$

onde A é a área da seção transversal.

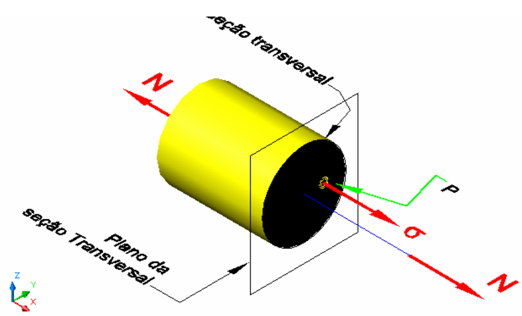


Figura 2- Tensão Normal que atua em um ponto P da seção transversal.

Na eventualidade de se estudar o mesmo ponto, porém sob a ótica de um plano inclinado em relação ao plano da seção transversal, a força aplicada ficará inclinada em relação ao plano. Com isto, para o plano inclinado existirá uma componente normal e uma componente cortante.

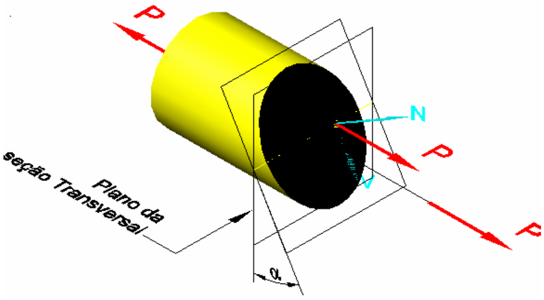


Figura 3- Componente Normal e Cortante em um plano inclinado.

As projeções, normal e de cisalhamento são determinadas por:

$$N = P \times \cos\alpha$$

$$V = P \times \operatorname{sen}\alpha$$

Note-se, que a estas componentes estão associadas, no ponto em estudo, uma tensão normal e uma tensão de cisalhamento. Estas tensões serão indicadas por σ^* e τ^*.

Sabendo-se que a área da seção no plano inclinado é $\frac{A}{\cos\alpha}$, estas tensões ficam:

$$\sigma^* = \frac{P \times \cos\alpha}{\frac{A}{\cos\alpha}} \rightarrow$$

$$\sigma^* = \frac{P \times \cos^2\alpha}{A} \rightarrow$$

$$\boxed{\sigma^* = \sigma \times \cos^2\alpha} \quad (2)$$

$$\tau^* = \frac{\frac{P \times \text{sen}\,\alpha}{A}}{\cos\alpha} \rightarrow$$

$$\tau^* = \frac{P \times \text{sen}\,\alpha \times \cos\alpha}{A} \rightarrow$$

$$\boxed{\tau^* = \sigma \times \text{sen}\,\alpha \times \cos\alpha}$$

ou

$$\boxed{\tau^* = \frac{\sigma}{2} \times \text{sen}\,2\alpha} \quad (3)$$

Verifica-se, então, que em função da inclinação do plano estudado, em relação ao plano da seção, variam as tensões, normal e de cisalhamento.

Note-se, também, que o máximo valor que a tensão normal assume ocorre quando α = 0; ou seja, quando o plano estudado é o plano da seção transversal.

A tensão de cisalhamento, por sua vez, possui o valor máximo quando α = 45°; ou seja, quando o plano estudado está a 45° do plano da seção transversal.

Para componentes onde atuam diferentes esforços solicitantes simultaneamente, a determinação das tensões que atuam em um ponto, em diferentes planos, se torna importante para que seja possível executar corretamente o dimensionamento.

O estudo do estado duplo, embora seja uma simplificação do caso geral de tensão que pode ocorrer em um ponto, é importante na medida em que, por ele se determina o estado de tensões que ocorrem, por exemplo, nos pontos da superfície de um objeto.

Equações gerais do estado duplo de tensão

Seja um ponto, com dimensões infinitesimais, que pertence a um corpo em equilíbrio, onde em um de seus planos (plano **0**), atua uma tensão normal (σ_0) e uma tensão de cisalhamento (τ_0).

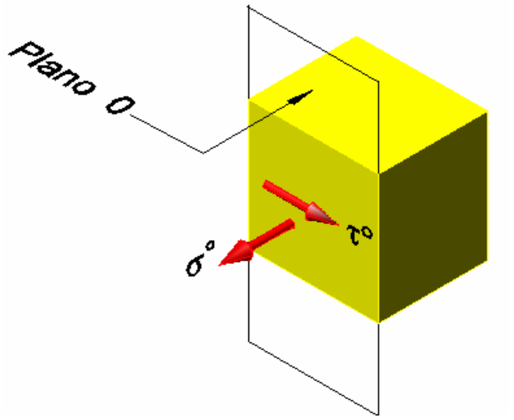


Figura 4- Tensão normal e de cisalhamento que atuam no plano 0.

Suponha-se, também, que no plano asterisco (*), também atuem uma tensão normal (σ*) e uma tensão de cisalhamento (τ*).

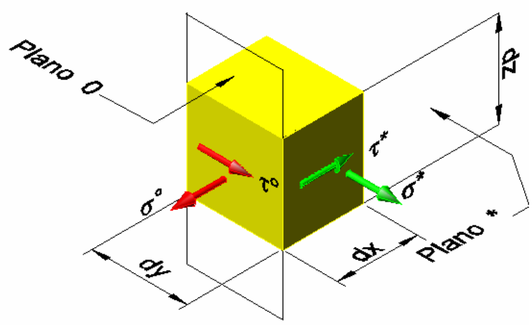


Figura 5- Tensão normal e de cisalhamento que atuam no plano 0 e no plano *.

Assim, em um outro plano qualquer, inclinado com um ângulo ω, em relação aos planos 0 e *, atuam tensões σ e τ, como se pode observar na figura 6.

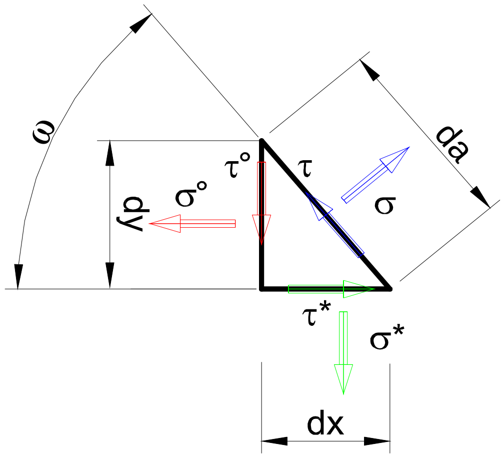


Figura 6- Tensões em planos de um estado duplo.

Deve-se lembrar que o ponto está em equilíbrio. Assim, os esforços que atuam em cada plano do ponto são obtidos pelo produto das tensões pela área da face contida no plano. Lembrando que a altura do ponto é dz e que cada esforço atua no centro de gravidade da face, se obtém:

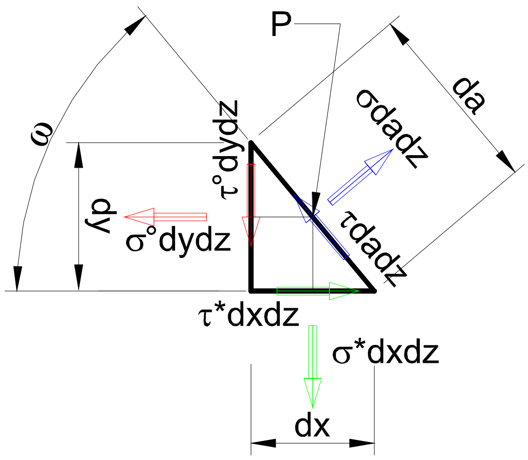


Figura 6- Tensões em planos de um estado duplo.

Assim, o equilíbrio do ponto se verifica quando:

$$\sum M(emP) = 0 \quad \rightarrow$$

$$\tau^0 dydz \times \frac{dx}{2} + \tau^* dxdz \times \frac{dy}{2} = 0$$

$$\boxed{\tau^* = -\tau^0} \quad (4)$$

A expressão acima mostra que <u>as tensões de cisalhamento em planos perpendiculares entre si são iguais e de sinais opostos</u>.

Uma outra condição de equilíbrio é a soma de forças igual a zero. Tomando-se a direção σ para esta condição, é possível escrever:

$$\sigma dadz + \tau^* dxdz \operatorname{sen}\omega - \tau^0 dydz \cos\omega - \sigma^0 dydz \operatorname{sen}\varpi - \sigma^* dxdz \cos\varpi = 0$$

$$\sigma da + \tau^* dx \operatorname{sen}\omega - \tau^0 dy \cos\omega - \sigma^0 dy \operatorname{sen}\varpi - \sigma^* dx \cos\varpi = 0$$
(5)

como $dx = da\cos\omega$ e $dy = da\operatorname{sen}\omega$, se obtém:

$$\sigma da + \tau^* da \cos s\omega \operatorname{sen}\omega - \tau^0 da \operatorname{sen}\omega\cos\omega - \sigma^0 da \operatorname{sen}\omega \operatorname{sen}\varpi - \sigma^* da \cos\omega\cos\varpi = 0$$

$$\sigma + \tau^* \cos s\omega \operatorname{sen}\omega - \tau^0 \operatorname{sen}\omega\cos\omega - \sigma^0 \operatorname{sen}^2\omega - \sigma^* \cos^2\omega = 0$$
(6)

Como $\tau^* = -\tau^0$ se encontra:

$$\sigma - 2\tau^0 \operatorname{sen}\omega\cos\omega - \sigma^0 \operatorname{sen}^2\omega - \sigma^* \cos^2\omega = 0$$

$$\sigma = \sigma^0 \operatorname{sen}^2\omega + \sigma^* \cos^2\omega + 2\tau^0 \operatorname{sen}\omega\cos\omega$$

ou

$$\boxed{\sigma = \sigma^0 \operatorname{sen}^2\omega + \sigma^* \cos^2\omega + \tau^0 \operatorname{sen}2\omega}$$
(7)

Quando se faz a soma de forças igual a zero, tendo como direção a direção de τ, se encontra:

$$\boxed{\tau = \frac{\sigma^0 - \sigma^*}{2} \operatorname{sen}2\omega + \tau^0\left(\operatorname{sen}^2\omega - \cos^2\omega\right)}$$
(8)

As expressões (7) e (8) mostram que a tensão normal e a tensão de cisalhamento que atuam em um plano dependem do ângulo ω.

Como as funções angulares são cíclicas, elas passam por um valor de máximo e um valor de mínimo. Assim, é possível entender que existirá um máximo e um mínimo para a tensão normal. A estas tensões se dá o nome de **Tensões Principais** e se indica por σ_1 e σ_2, respectivamente.

Aos planos onde atuam as tensões principais se dá o nome de **planos principais** e são indicados por 1 e 2, respectivamente.

Estudando-se o máximo e o mínimo das expressões (7) e (8), se encontra:

a) O ângulo que o plano principal 1 faz com o plano de σ^0 é determinado por:

$$\Omega = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sigma^0 - \sigma_1}{\tau^0}\right) \quad (9)$$

b) Os valores para σ_1 e σ_2, são determinados por:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma^0 + \sigma^*}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma^0 - \sigma^*}{2}\right)^2 + \tau^{0\,2}}$$

(10)

$$\sigma_2 = \frac{\sigma^0 + \sigma^*}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma^0 - \sigma^*}{2}\right)^2 + \tau^{0\,2}}$$

(11)

c) No plano de σ_1 e no plano de σ_2, a tensão de cisalhamento é igual a zero. Desta forma para que uma tensão normal seja tensão principal, basta que no plano em que ela atua, a tensão de cisalhamento seja nula.

d) De acordo com o item c, é possível deduzir que as tensões principais atuam em planos perpendiculares entre si.

e) A tensão de cisalhamento, como a tensão normal, possui um valor de máximo e um valor de mínimo. Estes valores são determinados por:

$$\tau_{máx} = -\tau_{mín} = \sqrt{\left(\frac{\sigma^0 - \sigma^*}{2}\right)^2 + \tau^{0\,2}}$$

(12)

f) Como $\tau_{máx}$ e $\tau_{mín}$ possuem o mesmo valor e sinais opostos, se pode concluir que estas tensões ocorrem em planos perpendiculares entre si.

g) O ângulo entre o plano de $\tau_{máx}$ e o plano de σ_1 é sempre igual a 45^0.

h) No plano de $\tau_{máx}$ e $\tau_{mín}$ a tensão normal que atua é determinada por:

$$\sigma = \frac{\sigma^0 + \sigma^*}{2} \quad (13)$$

i) Quando se soma a expressão (10) com a expressão (11), se verifica que:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma^0 + \sigma^* \quad (14)$$

Assim, para determinar as tensões principais, seus planos, as tensões de cisalhamento e seus planos, basta que sejam conhecidas as tensões em dois planos perpendiculares entre si.

Exemplo.

Em um ponto são conhecidas as tensões em dois planos perpendiculares entre si, como mostra a figura 7.

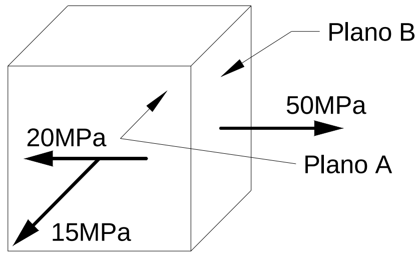


Figura 7- Tensões em planos perpendiculares de um estado duplo.

Para este estado de tensões, determinar:

a) As tensões principais
b) A tensão de cisalhamento máxima
c) O plano da tensão σ_1.

Solução:

As tensões que atuam no plano A são:

$$\sigma_A = 15MPa$$

$$\tau_A = 20MPa$$

Como o plano B é perpendicular ao plano A, a tensão de cisalhamento que nele atua tem o mesmo valor e sinal contrário àquela que atua no plano A. Com isto, as tensões que atuam neste plano são:

$$\sigma_B = 50MPa$$

$$\tau_B = -20MPa$$

(Item a)
De acordo com a expressão (10), é possível escrever:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_A - \sigma_B}{2}\right)^2 + \tau_A^2}$$

$$\sigma_1 = \frac{15+50}{2} + \sqrt{\left(\frac{15-50}{2}\right)^2 + 20^2}$$

$$\boxed{\sigma_1 = 59{,}1MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_A - \sigma_B}{2}\right)^2 + \tau_A^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{15+50}{2} - \sqrt{\left(\frac{15-50}{2}\right)^2 + 20^2}$$

$$\boxed{\sigma_2 = 5{,}9MPa}$$

(Item b)
De acordo com a expressão (12) é possível escrever:

$$\tau_{máx} = -\tau_{min} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_A - \sigma_B}{2}\right)^2 + \tau_A^2}$$

$$\tau_{máx} = -\tau_{min} = \sqrt{\left(\frac{15-50}{2}\right)^2 + 20^2}$$

$$\boxed{\tau_{máx} = -\tau_{min} = 26{,}6MPa}$$

(Item c)
De acordo com a expressão (9), se pode registrar:

$$\Omega = \mathrm{arctg}\left(\frac{\sigma_A - \sigma_1}{\tau_A}\right)$$

com esta expressão, o ângulo Ω encontrado será o ângulo entre o plano A e o plano 1. Assim, se tem:

$$\Omega = \mathrm{arctg}\left(\frac{15-59{,}1}{20}\right)$$

$$\boxed{\Omega = 65{,}6^{o}}$$

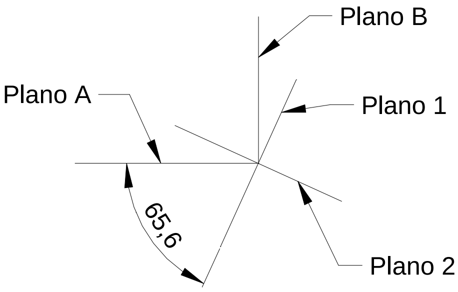


Figura 8- Planos principais para o estado duplo da figura 7.

Círculo de Mohr

O Círculo de Mohr é uma forma gráfica de resolver um estado de tensões.

Para que seja possível o uso do Círculo de Mohr, é necessário que cada plano seja representado por um ponto em um sistema de coordenadas (σ;τ), como mostra a figura 9.

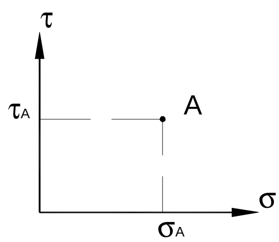


Figura 9- Plano representado pelas tensões que nele atuam no sistema σ;τ.

Neste tipo de representação, é possível notar que:

a) Os planos das tensões principais são representados por pontos que se encontram no eixo σ, já que neles a tensão de cisalhamento é igual a zero.

b) As tensões de cisalhamento, máxima e mínima, são representadas por pontos que são simétricos em relação ao eixo σ. Lembrar que nestes planos ocorre a mesma tensão normal e que as tensões de cisalhamento são iguais e de sinais opostos.

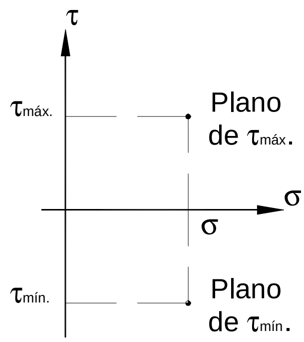


Figura 10- Planos das tensões de cisalhamento, máxima e mínima.

c) Quando são observadas as expressões (13) e (14), se conclui que a tensão normal que atua nos planos das tensões de cisalhamento, máxima e mínima, é igual à média aritmética das tensões principais.

d) Planos perpendiculares entre si são representados por pontos que à mesma distância do eixo σ, porém em lados opostos. Note-se aqui que a tensão normal média dos dois planos é igual à tensão média das tensões principais

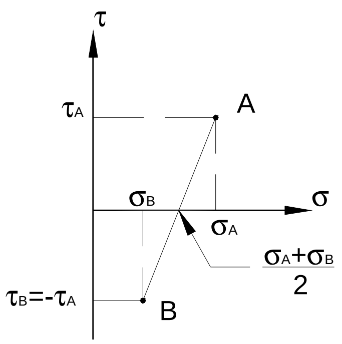


Figura 11- Planos perpendiculares entre si no sistema $\sigma;\tau$.

e) A figura geométrica que satisfaz a todas estas condições simultaneamente é um círculo. A este círculo se dá o nome de **Círculo de Mohr**.

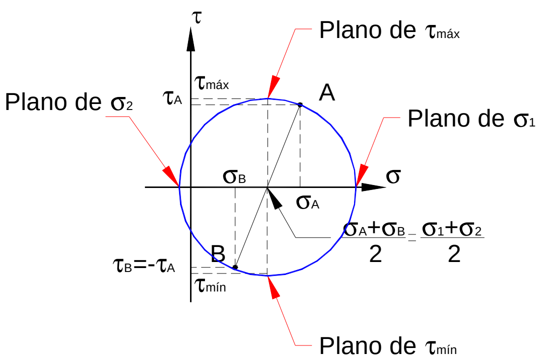


Figura 12- Círculo de Mohr.

De acordo com o exposto, é possível traçar o Círculo do Mohr para qualquer estado duplo. Para tal, se deve observar:

1. Planos perpendiculares entre si são representados por pontos diametralmente opostos.
2. O centro do Círculo de Mohr se encontra no eixo σ.
3. A tensão principal σ_1 se determina intersecção entre o eixo σ e o lado direito do círculo
4. A tensão principal σ_2 se determina intersecção entre o eixo σ e o lado esquerdo do círculo
5. As tensões de cisalhamento, máxima e mínima, são determinadas pelas tangentes horizontais ao círculo.
6. Conhecidas as tensões em dois planos perpendiculares entre si, o centro do círculo de Mohr se encontra na média entre as tensões normais que atuam nestes planos. Isto pode ser observado na figura 12.
7. Conhecidas as tensões em dois planos perpendiculares entre si, o raio do círculo de Mohr pode ser determinado pela hipotenusa do triângulo hachurado na figura 13.

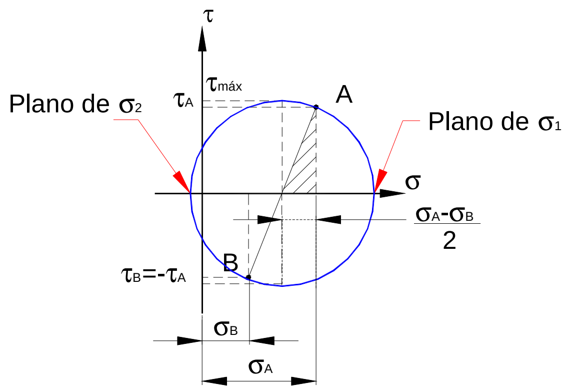


Figura 12- Determinação do raio do Círculo de Mohr.

$$\boxed{\text{Raio} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_A - \sigma_B}{2}\right)^2 + \tau_A^2}} \quad (15)$$

8. Quando se compara a expressão (15) com a expressão (12), se nota que o raio do Círculo de Mohr é igual ao valor da tensão de cisalhamento máxima.
9. A tensão principal máxima pode ser determinada pela soma entre o raio do círculo e a tensão normal média dos planos perpendiculares entre si.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} + \text{Raio}$$

$$\boxed{\sigma_1 = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_A - \sigma_B}{2}\right)^2 + \tau_A^2}}$$
(16)

10. A tensão principal mínima pode ser determinada pela diferença entre o raio do círculo e a tensão normal média dos planos perpendiculares entre si.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} - \text{Raio}$$

$$\boxed{\sigma_1 = \frac{\sigma_A + \sigma_B}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_A - \sigma_B}{2}\right)^2 + \tau_A^2}}$$
(17)

11. O ângulo entre um plano do estado duplo e o plano onde atua σ_1, pode ser determinado por:

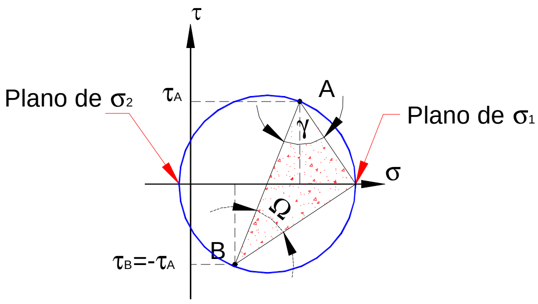


Figura 13- Determinação do ângulo entre dois planos no Círculo de Mohr.

Na figura 13, o ângulo Ω é o ângulo entre o plano A e o plano de σ_1. Na mesma figura o ângulo γ é o ângulo entre o plano B e o plano de σ_1.

Quando se observa que o triângulo traçado é um triângulo retângulo (a hipotenusa é um diâmetro do círculo), o ângulo entre os planos A e B é determinado pelo ângulo reto que ocorre no vértice oposto à linha que une os dois planos.

Desta maneira, é possível determinar o ângulo entre dois planos quaisquer dentro do círculo de Mohr. Para isto é necessário traçar um triângulo retângulo onde a hipotenusa é um diâmetro do círculo, que contenha o ponto que representa um destes planos. O ponto que representa o outro plano deve estar na intersecção dos dois catetos.

Na figura 14 estão representados os planos A; B e C. Os planos A e C, são perpendiculares entre si e estão diametralmente opostos. Note que o ângulo entre estes planos é medido no vértice oposto à linha que une os pontos A e C.

O ângulo entre os planos B e Ce igual a 40° e é medido no vértice A. Da mesma maneira o ângulo entre os planos A e B é igual a 50° e é medido no vértice C.

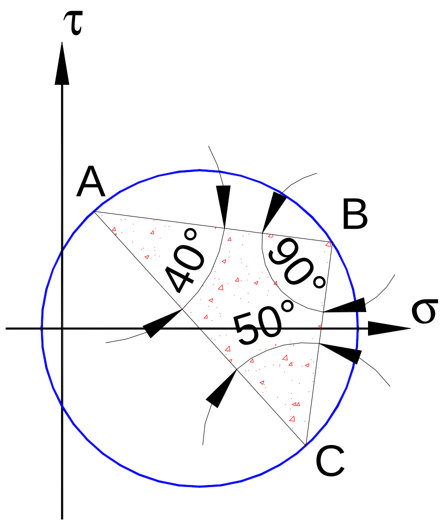
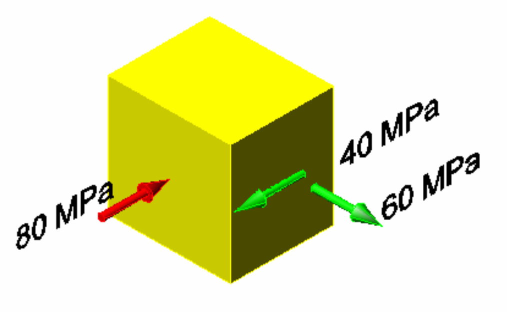


Figura 14- Determinação do ângulo entre dois planos no Círculo de Mohr.

Lista 2

1. A figura mostra um ponto material limitado por planos. As tensões indicadas caracterizam o estado duplo de tensões para este plano. Determinar o Círculo de Mohr; as tensões principais e a máxima tensão de cisalhamento.



2. Em um eixo de 50 mm de diâmetro, atua um momento fletor de 300 Nm e um momento de torção de 200 Nm. Determinar, para um ponto do perímetro externo do eixo, as tensões principais e o ângulo entre o plano da seção e o plano de σ_1.

Resposta –
σ_1 = 27 MPa; σ_2 = -2,5 MPa
Ω = 73º.

3. Para o exemplo anterior, determinar a tensão de cisalhamento máxima e a tensão normal que atua em seu plano.

Resposta –
$\tau_{máx}$ = 14,7 MPa; σ = 12,2 MPa

4. Em umponto são conhecidas as tensões em dois planos perpendiculares entre si.

$$\text{Plano } \alpha \begin{Bmatrix} \sigma = -20\text{MPa} \\ \\ \tau = -30\text{MPa} \end{Bmatrix}$$

$$\text{Plano } \beta \begin{Bmatrix} \sigma = 40\text{MPa} \\ \\ \tau = \end{Bmatrix}$$

Determinar:
   a. As tensões principais
   b. A tensão de cisalhamento máxima
   c. O plano da tensão de σ_1

Resposta –
σ_1 =52 MPa; σ_2 = -32 MPa;
$\tau_{máx}$ = 42 MPa Ω = 67,5º.

5. Repita o exemplo número 2, resolvendo agora, pelo Círculo de Mohr.

6. Em um estado plano de tensões, as tensões que agem em dois planos, não perpendiculares, são:

$$\text{Plano r} \begin{Bmatrix} \sigma_r = 50\text{MPa} \\ \\ \tau_r = 30\text{MPa} \end{Bmatrix}$$

$$\text{Plano s} \begin{Bmatrix} \sigma_s = -30\text{MPa} \\ \\ \tau_s = 30\text{MPa} \end{Bmatrix}$$

Desenhar para este estado duplo o Círculo de Mohr e determinar as tensões principais.

7. Em um estado plano de tensões, as tensões que agem em dois planos, não perpendiculares, são:

$$\text{Plano r} \begin{Bmatrix} \sigma_r = 50\text{MPa} \\ \\ \tau_r = 30\text{MPa} \end{Bmatrix}$$

$$\text{Plano s} \begin{Bmatrix} \sigma_s = 10\text{MPa} \\ \\ \tau_s = 10\text{MPa} \end{Bmatrix}$$

Desenhar para este estado duplo o Círculo de Mohr e determinar:

a. As tensões principais
b. O ângulo entre os planos r e s
c. O ângulo entre o plano r e o plano 1
d. A tensão de cisalhamento máxima
e. O ângulo entre o plano s e o plano de $\tau_{máx}$.

Resposta
σ_1 = 71 MPa; σ_2 = 8 MPa; $\tau_{máx}$ = 32 MPa; α_{rs} = 44º; α_{r1} = 37º; $\alpha_{r\ -\ \tau máx}$ = 37º

8. O estado duplo de tensões que atua em um ponto é caracterizado pelas tensões que agem em dois planos:

$$\text{Plano } \alpha \begin{Bmatrix} \sigma = 100\text{MPa} \\ \\ \tau = 30\text{MPa} \end{Bmatrix}$$

$$\text{Plano } \beta \begin{Bmatrix} \sigma = 20\text{MPa} \\ \\ \tau = 30\text{MPa} \end{Bmatrix}$$

Usando o círculo de Mohr, determinar o ângulo entre estes planos.

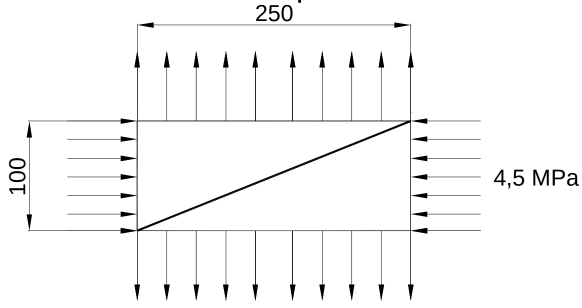
9. Desenhar o Círculo de Mohr para o estado duplo de tensões que existe em um ponto, conhecendo as tensões que atuam nos planos α e β, perpendiculares entre si.

$$\text{Plano } \alpha \begin{Bmatrix} \sigma = 40\text{MPa} \\ \\ \tau = 60\text{MPa} \end{Bmatrix}$$

$$\text{Plano } \beta \begin{Bmatrix} \sigma = -30\text{MPa} \\ \\ \end{Bmatrix}$$

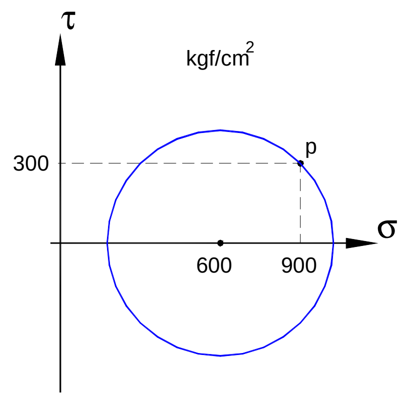
Determinar, então, as tensões principais, a máxima tensão de cisalhamento e o ângulo entre o plano α e o plano em que atua a mínima tensão de cisalhamento.

10. A placa da figura foi obtida por meio da solda entre sois triângulos. Determine a tensão normal e a tensão de cisalhamento no plano da solda.



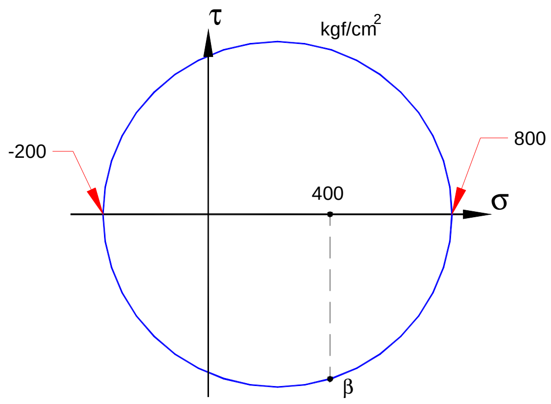
Resposta –
σ_s = 8,5 MPa; τ_s = 4,5 MPa

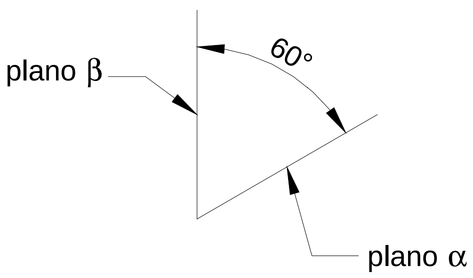
11. A figura mostra o Círculo de Mohr que representa o estado duplo de tensões de um ponto. No círculo, o ponto P é o pólo associado ao plano vertical π. Determinar o ângulo entre o plano p e o plano onde atua a máxima tensão de cisalhamento.



12. A figura mostra um Círculo de Mohr relativo a um estado duplo de tensões que existe em um

ponto; também são mostrados os planos α e β. Determinar as tensões que atuam nestes dois planos e determinar, o ângulo entre o plano β e o plano onde a tua a mínima tensão normal.





13. Um rebite de 10mm de diâmetro foi montado em uma junta tal que a força normal, residual, de tração no rebite é de 5 kN. Este rebite trabalha, na junta, de tal forma que a força cortante que nele atua é de 8 kN. Considerando que o estado de tensões seja um estado duplo, determinar:
    a. O Círculo de Mohr.
    b. As tensões principais.
    c. A tensão de cisalhamento máxima.
    d. O ângulo entre a tensão principal máxima e o plano da seção.

Resposta
σ_1 = 140 MPa; σ_2 = -75 MPa; $\tau_{máx}$ = 108 MPa; α = 37º a partir do plano 0.

14. Uma barra circular de 50mm de diâmetro está sujeita a um momento de torção de 5 kNm. O material desta barra tem comportamento frágil e entra em ruína quando a tensão normal atinge 300 MPa. Determinar:
    a. O círculo de Mohr para o estado de tensões.
    b. As tensões principais.
    c. O coeficiente de segurança que está ocorrendo nesta situação.

15. Uma barra circular de 25mm de diâmetro foi tracionada até que ocorreu a ruptura. Durante o ensaio, a deformação plástica iniciou quando a força de tração aplicada atingiu 50 kN. Determinar, quando esta força está sendo aplicada, a máxima tensão de cisalhamento que está ocorrendo.

16. Em um estado duplo de tensões, as trensões que atuam em dois planos são:

$$\text{Plano r}\ \left\{\begin{matrix}\sigma_r = 50\text{MPa} \\ \tau_r = 30\text{MPa}\end{matrix}\right\}$$

$$\text{Plano s}\ \left\{\begin{matrix}\sigma_s = 50\text{MPa} \\ \tau_s = -30\text{MPa}\end{matrix}\right\}$$

O plano r está inclinado com um ângulo igual a 60° do plano s, no sentido anti-horário. Para esta situação determinar:
    a. O Círculo de Mohr
    b. As tensões principais.
    c. As tensões de cisalhamento, máxima e mínima.
    d. O ângulo entre oplano r e o plano da tensão de cisalhamento máxima.

17. Uma barra de gesso com 10 mm de diâmetro, sofre um momento de torção que a leva à ruptura. Sabe-se que o gesso é um material frágil que rompe quando a tensão normal de tração máxima atinge 20 MPa. Considerando apenas a existência de um estado duplo, determinar:
    a. O momento de torção que leva a barra à ruptura.
    b. O ângulo entre o plano de σ_1 e o plano da seção.

Resposta
T = 3,9 Nm; α = 45º a partir do plano de σ_1.