CAPÍTULO 5

ANÁLISE PLÁSTICA

Quando uma dada peça ou um componente estrutural vem a falhar, por algum modo de falha que dependa da resistência e não da estabilidade, podemos dizer que o início da falha vai ocorrer nos pontos mais solicitados do material e nestes pontos a solicitação atuante muito provavelmente ultrapassa o limite elástico do material. Assim sendo, para que possamos analisar em maiores detalhes o comportamento de uma dada peça quando nas suas condições críticas, na eminência de falha, torna-se necessário o estudo do que ocorre com o material quando este penetra dentro da região elasto-plástica. Este Capítulo preocupa-se em detalhar alguns aspectos relacionados com a análise do comportamento de uma peça ou componente estrutural, quando solicitado acima da tensão limite de escoamento, quanto à sua resistência mecânica, ou quanto à formação de tensões e deformações residuais no material, de importância fundamental para o estudo da fadiga, ou da ruptura frágil. Conforme discutido no Capítulo três, o comportamento elástico do material fica limitado pela tensão limite de elasticidade, porém, pela dificuldade de sua obtenção, na prática usamos a tensão limite de escoamento. Agindo desta forma o material já tem alguma deformação plástica quando o critério de início de escoamento é satisfeito. Para aplicações práticas de um modo geral este fato não chega a apresentar problemas ou dificuldades, mas é necessário que o tenhamos sempre em mente, de modo a interpretar adequadamente os resultados obtidos, quanto à capacidade de carga da peça, por exemplo.

5.1 - TEORIAS DE FALHA

Dentre os mais variados modos de falha que podem ocorrer em componentes estruturais de um produto, ou equipamento, um dos que primeiro despertou interesse, e que foi exaustivamente estudado, é o de início de escoamento. Uma falha por escoamento é provocada por mecanismos de deformação plástica, como o movimento de discordâncias ao longo de um plano atômico. Em um enfoque macroscópico, o início do escoamento deve ser caracterizado pelo nível de esforço que atua sobre o material, que habitualmente é dado pelo estado de tensões e de deformações que existe no ponto crítico, ou seja, o ponto mais solicitado. Assim, para o estudo de uma falha por início de escoamento, é necessário conhecermos o estado de tensões no ponto de interesse.

Devido aos carregamentos impostos, qualquer peça mecânica, ou elemento estrutural, está sujeita a um complexo estado de tensões. A partir deste estado de tensões podemos determinar, por exemplo, as tensões principais e a máxima tensão cisalhante. As equações de transformação de tensões estão colocadas a seguir, para o caso em que o ponto do material sob análise se encontre em um estado plano de tensões, que é uma situação bastante comum. A tensão σ_i é uma das tensões principais e $\tau_{máx}$ é a tensão cisalhante máxima no plano. Devemos lembrar a convenção a respeito das tensões principais, de que sempre $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. As variáveis envolvidas nas equações de transformação de tensões estão indicadas, com a correspondente convenção positiva, na figura 5.1.

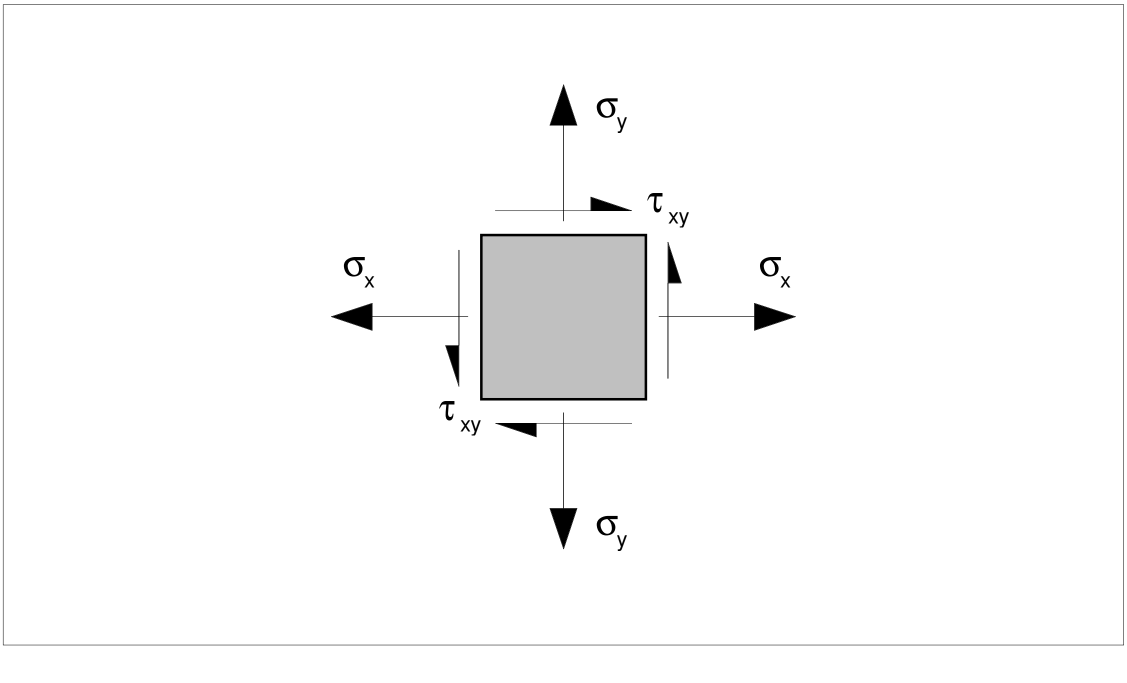

Figura 5.1 - Estado plano de tensões considerado no plano xy.

$$\sigma_i = 0{,}5\,(\sigma_x + \sigma_y) \pm [(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 2 + \tau_{xy}^2]^{0,5} \quad (5.1)$$

$$\tau_{máx} = [(\sigma_x - \sigma_y)^2 / 2 + \tau_{xy}^2] \quad (5.2)$$

A energia de distorção, para o estado de tensões indicado na figura 5.1 é calculada a partir das tensões principais σ_1 ,σ_2 e σ_3. A equação que fornece a densidade de energia de distorção para um estado triaxial de tensões, em função das tensões principais, é:

$$U_d = ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2) / 12\,G \quad (5.3)$$

Todos os critérios de falha, desenvolvidos para prever o início de escoamento, tomam como referência os resultados obtidos a partir de ensaios de corpos de prova por tração simples. Do ensaio de tração podemos, por exemplo, calcular as tensões principais para o ponto de início de escoamento, a tensão cisalhante máxima e a energia de distorção, cujos resultados são listados a seguir. Os índices ET e EC indicam escoamento na tração e compressão respectivamente, caso obtenhamos dados também de um ensaio de compressão.

$$\begin{aligned} &\sigma_1 = \sigma_{ET} \\ &\sigma_1 = 0 \\ &\sigma_1 = \sigma_{EC} \qquad (5.4) \\ &\tau_{máx} = \sigma_E / 2 \\ &U_d = 2\,\sigma_1 / 12\,G \end{aligned}$$

Convém ressaltar que os resultados acima são obtidos a partir dos dados fornecidos pelo diagrama tensão-deformação. No caso de uma peça de uma estrutura, os carregamentos normalmente impõem um estado de tensões complexo no material, o qual não se assemelha com o que se desenvolve no interior do material em um corpo de prova do ensaio de tração. A partir do estado de tensões existente na peça podemos determinar as tensões principais, a tensão cisalhante máxima e a energia de distorção. Os diferentes critérios de falha procuram relacionar o que acontece na peça em estudo, com o que acontece em um corpo de prova do mesmo material. Este relacionamento é feito com grandezas de mesmo tipo, que ocorrem na peça e no corpo de prova, as quais dependem do modo de falha que o material pode apresentar. A tensão normal máxima, a tensão cisalhante máxima ou então a energia de distorção, que ocorrem quando da falha do corpo de prova, comparadas com as mesmas grandezas, que ocorrem na peça, no seu ponto crítico, estabelecem os critérios de falha. Estas grandezas, obtidas a partir do estado de tensões existente na peça, permitem definir o conceito de tensão equivalente, que é a tensão que, atuando no corpo de prova do ensaio de tração, leva o material ao mesmo valor limite que o estado de tensões existente na peça, para a grandeza adotada como a que caracteriza o estado limite do material. A Tabela 5.1 mostra para cada um das teorias de falha a expressão da tensão equivalente, no ensaio de tração e na peça, considerando um estado plano de tensões nesta. Igualando as colunas da tabela fica definido o critério de falha para cada uma das teorias, respectivamente a Teoria da Máxima Tensão Normal, a Teoria da Máxima Tensão Cisalhante e a Teoria da Máxima Energia de Distorção.

TABELA 5.1

Expressões da tensão equivalente segundo as teorias de falha por início de escoamento mais usuais.

TEORIA	ENSAIO	PEÇA
TMTN	$\sigma_{eq} = \sigma_{ET}; \sigma_{EC}$	$\sigma_1 = \sigma_1; \sigma_3$
TMTC	$\tau_{eq} = \sigma_E /2$	$\tau_{eq} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2$
TMED	$\sigma_{eq} = \sigma_E$	$\sigma_{eq} = (U_d\, 6\, G)^{1/2}$

Exemplificando para uma situação particular, onde o estado de tensões é o indicado na figura 5.2, podemos calcular a tensão normal que, atuando isoladamente, ou seja, considerando um estado uniaxial de tensões, leva ao mesmo valor para a grandeza considerada como relevante pela teoria que está sendo usada. Essa tensão normal é a tensão equivalente, segundo a teoria adotada. As equações abaixo mostram as tensões equivalentes para as teorias indicadas.

TEORIA DA MÁXIMA TENSÃO NORMAL

$$\sigma_{eq,T} = \sigma_x / 2 + [(\sigma_x^2 / 2) + \tau_{xy}^2]^{1/2}$$

$$\sigma_{eq\,C} = \sigma_x / 2 - [(\sigma_x^2 / 2) + \tau_{xy}^2]^{1/2} \qquad (5.5)$$

TEORIA DA MÁXIMA TENSÃO CISALHANTE

$$\sigma_{eq} = [\sigma_x^2 + 4\, \tau_{xy}^2]^{1/2} \qquad (5.6)$$

TEORIA DA MÁXIMA ENERGIA DE DISTORÇÃO

$$\sigma_{eq} = [\sigma_x^2 + 3\, \tau_{xy}^2]^{1/2} \qquad (5.7)$$

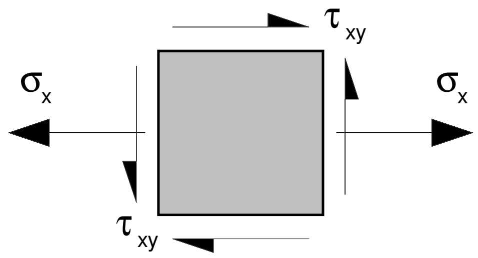

Figura 5.2 - Elemento de volume submetido a tensões σ_x e τ_{xy}.

Para o desenvolvimento das teorias de colapso foram feitas hipóteses sobre o material, as quais devem também ser satisfeitas quando do uso das teorias, para uma aplicação correta. Estas hipóteses são normalmente colocadas como:

- O material é homôgeneo;

- O material é isento de defeitos.

Para o caso de carregamentos uniaxiais, quando da falha, temos valores bem definidos para

- Tensão normal máxima (tensão principal);

- Deformação axial;

- Tensão cisalhante máxima;

- Energia de deformação,

sendo que cada uma destas grandezas pode ser usada como parâmetro crítico de um critério de falha. No caso de uma solicitação uniaxial, para o instante de falha, todas as grandezas anteriores atingem o correspondente valor limite ao mesmo tempo, não havendo, assim, diferença entre os critérios usados para definir a falha. Para componentes estruturais submetidos a esforços que causam estados bi ou triaxiais de tensões, a situação é bastante diversa, já que as quatro grandezas discutidas anteriormente não atingem os seus valores críticos simultaneamente, como ocorre para o caso do estado uniaxial de tensões. Com isto, podemos falar que a causa da falha não é conhecida exatamente. Os critérios de falhas mais comuns, desenvolvidos a partir das grandezas listadas anteriormente são discutidos a seguir.

TEORIA DA MÁXIMA TENSÃO CISALHANTE.

A teoria da máxima tensão cisalhante prevê que a falha do material ocorre quando a máxima tensão cisalhante que atua, no material da peça, atingir o valor correspondente ao obtido em um ensaio de tração simples, para este mesmo material. Esta teoria foi originalmente apresentada por Tresca. Para o ensaio de tração a tensão cisalhante se relaciona com a tensão limite de escoamento através da fórmula

$\tau_E = \sigma_E / 2$

Para a peça, considerando a tensão de escoamento como critério para definir o início de falha, temos, para qualquer estado de tensão, com $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, que devemos ter a desigualdade da equação (5.8) satisfeita para que o material não venha a deformar-se plasticamente.

$$\sigma_E \geq \sigma_1 - \sigma_3 \qquad (5.8)$$

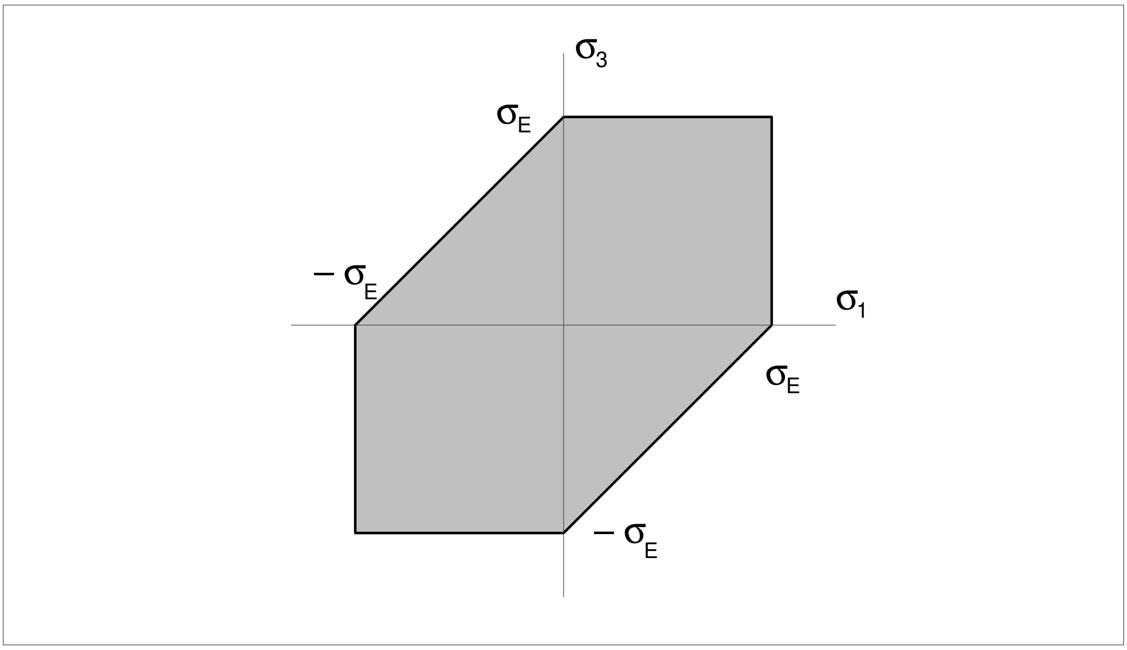

Figura 5.3 - Região de segurança no plano σ_1 - σ_3 , para a teoria de Tresca.

TEORIA DA MÁXIMA TENSÃO NORMAL

A teoria da máxima tensão normal, conhecida também como teoria de Rankine, prevê que a falha do material ocorre quando a maior tensão principal, em módulo, atingir o limite correspondente ao do material obtido em um ensaio de tração ou compressão uniaxial. Este limite pode ser a tensão limite de escoamento ou a tensão limite de resistência, sob tração, ou sob compressão, conforme o caso. Para esta teoria o critério de falha, em função das tensões principais, é:

$$
\begin{aligned}
&\sigma_1 < \sigma_{ET}\ ;\ \sigma_{RT} \\
&\sigma_3 > \sigma_{EC}\ ;\ \sigma_{RC}
\end{aligned}
\qquad (5.9)
$$

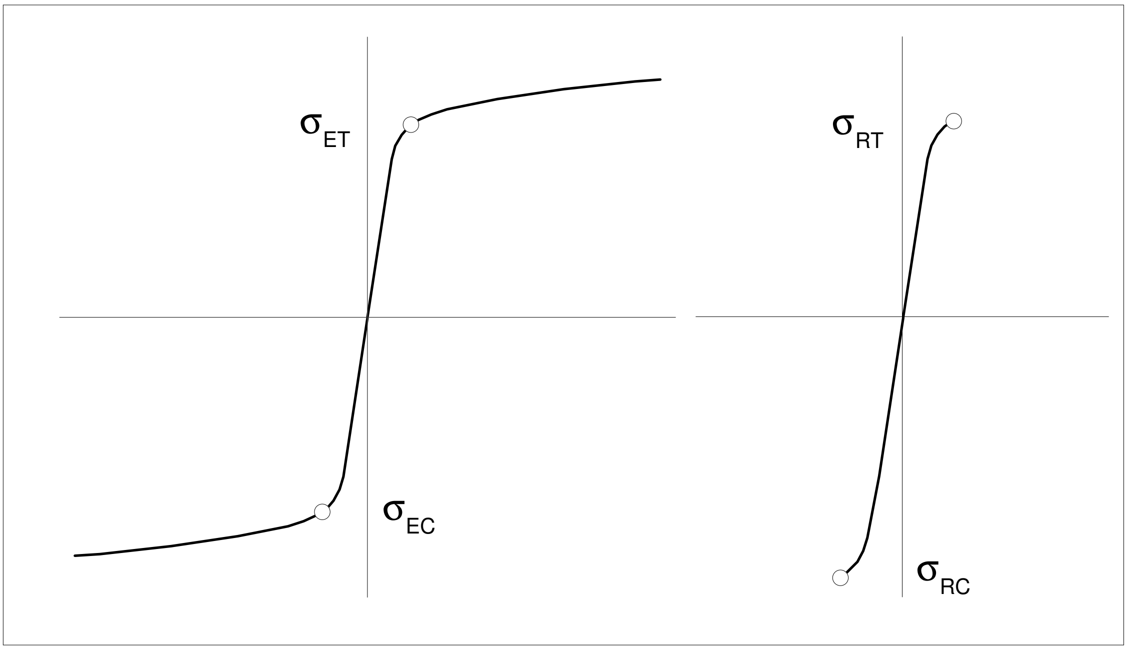

Figura 5.4 - Diagrama tensão-deformação sob tração e compressão.

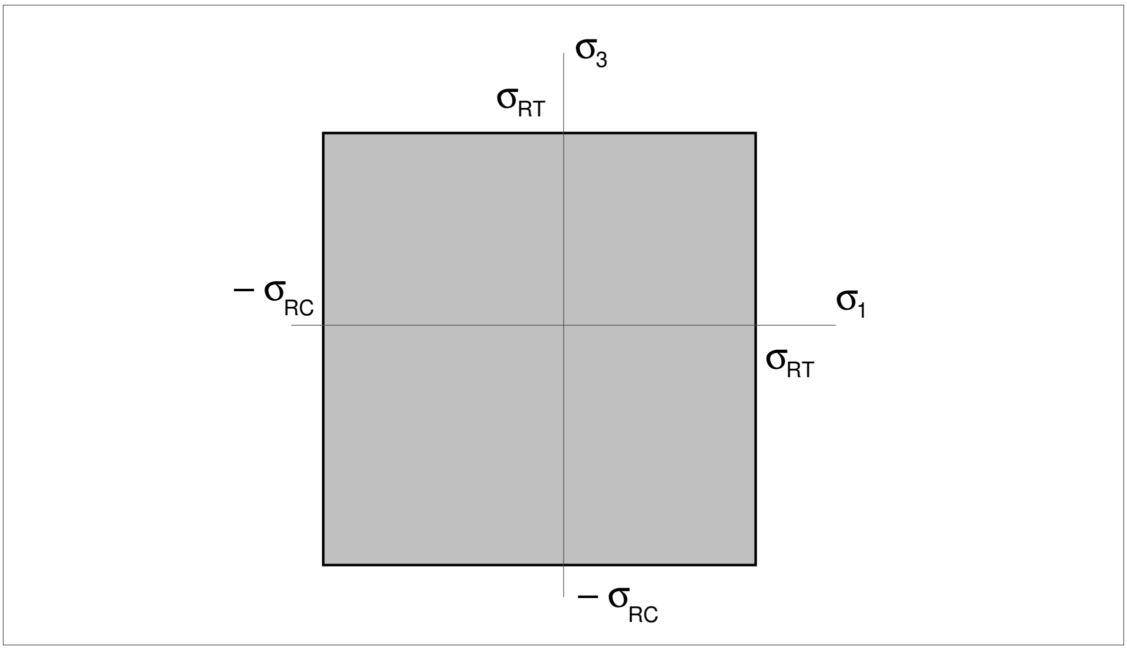

Figura 5.5 - Região de segurança para a teoria da máxima tensão normal.

TEORIA DA MÁXIMA ENERGIA DE DISTORÇÃO

A teoria da máxima energia de distorção, também conhecida como critério de Von Mises, ou de Henky, prevê que a falha ocorre quando, em qualquer ponto do material, a energia de distorção, por unidade de volume, for maior que o valor limite obtido no ensaio de tração do material. Este critério, para um estado triaxial de tensões, está representado por:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 < 2 \sigma_E^2 \qquad (5.10)$$

onde a desigualdade indica a região de segurança. Para um estado bidimensional de tensões, a equação anterior fica

$$(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3 \tau_{xy}^2) < \sigma_E^2 \qquad (5.11)$$

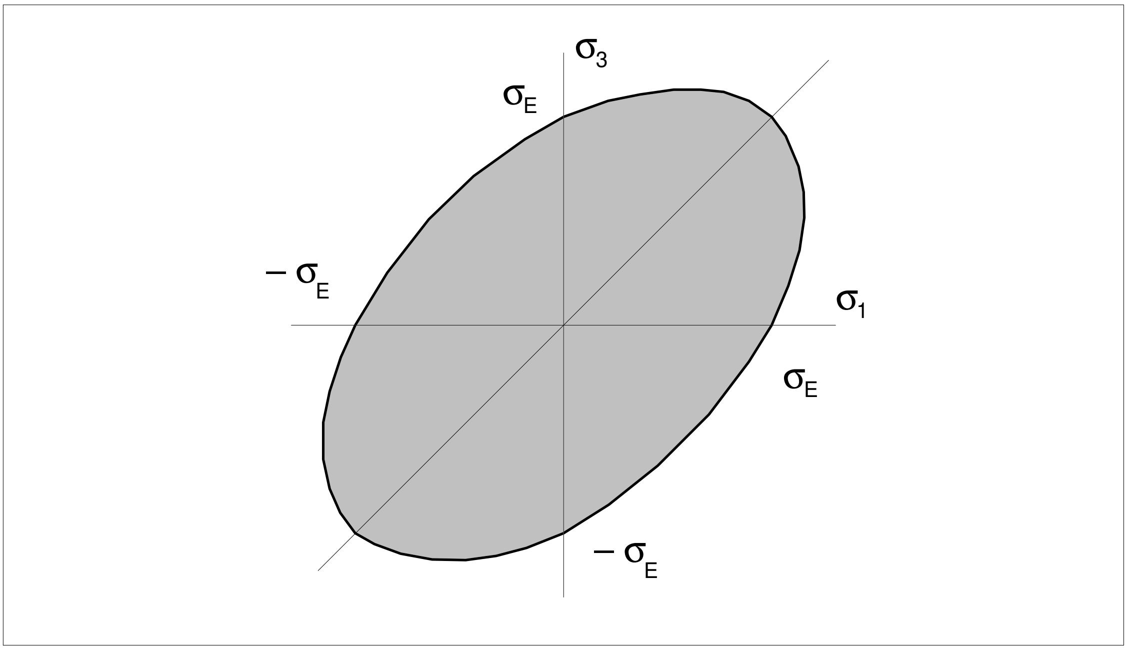

Figura 5.6 - Região de segurança de acordo com o critério da máxima energia de distorção.

A figura 5.6 mostra a representação do critério de Von Mises, equação (5.10), onde a região de segurança é definida pelo interior da região eliptica. Como uma particularização, para o caso de torção pura, temos $\sigma_x = \tau$ e $\sigma_y = - \tau$ e logo,

$$\tau^2 + \tau^2 + \tau^2 < \sigma_E^2$$

$3\,\tau^2 < \sigma_E^2$

e na condição de escoamento iminente resulta:

$$\tau = \sigma_E / \sqrt{3} = 0{,}577\ \sigma_E \qquad (5.12)$$

5.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PRINCIPAIS TEORIAS

A seguir são apresentados alguns casos clássicos de problemas da Mecânica dos Sólidos e as respectivas tensões principais e cisalhante máxima, sendo feita a Tabela 5.2, comparativa entre cada um dos critérios de falha. Os casos considerados são os quatro abaixo, onde σ e τ são as tensões nominais, para o tipo de problema e carregamento. Em uma análise mais rigorosa, com pressões elevadas, é necessário considerar $\sigma_3 = -\,p$ para os casos 3 e 4.

1 - Tração uniaxial.

$\sigma_1 = \sigma$; $\sigma_2 = 0$; $\sigma_3 = 0$

2 - Torção pura.

$\sigma_1 = \tau$; $\sigma_2 = 0$; $\sigma_3 = -\,\tau$

3 - Reservatório esférico com pressão interna.

$\sigma_1 = \sigma$; $\sigma_2 = \sigma$; $\sigma_3 = 0$

4 - Reservatório cilíndrico com pressão interna.

$\sigma_1 = \sigma$; $\sigma_2 = \sigma/2$; $\sigma_3 = 0$

Para selecionarmos qual a teoria de colapso a ser empregada em uma dada situação devemos saber distinguir os prováveis modos de falha, independentes do tempo, para esta situação. Estes modos de falha vão estar ligados com o tipo de comportamento que o material apresenta. Para a maioria dos materiais usados na prática, podemos enquadrá-los em dois grupos principais, cujos mecanismos de falha são comentados sucintamente a seguir.

MATERIAIS FRÁGEIS

A falha nestes materiais é em geral por ruptura, onde ocorre um crescimento instável de pequenos defeitos, como porosidades e inclusões, através de uma fratura por clivagem. Este crescimento instável leva à ruptura final.

MATERIAIS DÚTEIS

A falha por deformações plásticas ocorre por escorregamento dos planos atômicos, com movimento intenso das discordâncias. A fratura dútil por sua vez ocorre por um crescimento e coalescimento de vazios que são formados em torno de impurezas do material e um cisalhamento final leva à ruptura.

Desta forma, os modos de falha mais comuns são:

- Ruptura Frágil;

- Escoamento;

- Ruptura Dútil.

O uso das teorias de falha apresentadas adapta-se aos dois primeiros modos. Para ruptura frágil, em peças isentas de defeitos, a Teoria da Máxima Tensão Normal é suficientemente exata, embora a teoria de Mohr seja mais precisa em certas situações, [98]. No caso da existência de defeitos é obrigatório o uso da teoria da Mecânica da Fratura, objeto de estudo dos Capítulos 6 e 7.

Para falha devida ao início de escoamento, a teoria mais exata é a da Máxima Energia de Distorção, porém a Teoria da Máxima Tensão Cisalhante apresenta resultados não muito diversos, sendo de uso mais simples que a primeira. Para a falha por escoamento, tratada de uma forma genérica, o uso da Teoria da Máxima Energia de Distorção ou da Máxima Tensão Cisalhante é uma questão pessoal, já que os resultados práticos não são muito diferentes, quando é usada uma ou outra teoria. Quando desejamos um maior aprofundamento sobre o comportamento mecânico do material, devemos dividir a falha por escoamento em duas partes, uma de início do processo de deformação plástica e outra de continuidade da deformação. Para o início do escoamento, o movimento das discordâncias inicia quando é atingido um estado crítico no material, o que é melhor representado, de acordo com resultados experimentais, pela energia de distorção. Assim, como orientação, podemos considerar que a Teoria da Máxima Energia de Distorção é recomendada para uma análise de início de escoamento, enquanto que a Teoria da Máxima Tensão Cisalhante é recomendada para a análise de deformação plástica, após o início do escoamento, já que modela melhor o mecanismo de deformação plástica pelo escorregamento dos planos atômicos, o qual está diretamente relacionado com a tensão cisalhante que age. Para a ruptura dútil, estas teorias baseadas em modelos mais simples não se adaptam, e assim é necessário um desenvolvimento teórico mais adequado, baseado no nível de deformação plástica que ocorre no ponto crítico e na triaxialidade do estado de tensões neste ponto, [25, 37, 60].

TABELA 5.2

Comparação das teorias de falha para os quatro casos apresentados.

PROBLEMA	TMTN	TMTC	TMED
Tração	$\sigma = \sigma_E$	$\sigma = \sigma_E$	$\sigma = \sigma_E$
Torção	$\sigma = \sigma_E$	$\tau = 0{,}5\ \sigma_E$	$\tau = 0{,}577\ \sigma_E$
Resevatório esférico	$\sigma = \sigma_E$	$\sigma = \sigma_E$	$\sigma = \sigma_E$
Reservatório cilindrico	$\sigma = \sigma_E$	$\sigma = \sigma_E$	$\sigma = 1{,}1547\ \sigma_E$

5.3 - FLEXÃO PLÁSTICA

O estudo da flexão pura de peças prismáticas, para um material com comportamento elástico ideal, é assunto dos primeiros contatos com a teoria da Mecânica dos Sólidos.

Para que possamos estender agora o nosso campo de interesse para a região do comportamento do material com deformações plásticas, é conveniente recordar alguns pontos básicos da teoria da flexão elástica.

A equação de flexão, deduzida na Mecânica dos Sólidos, fornece a tensão na fibra que fica a uma distância y da linha neutra, como:

$$\sigma_x = - M\, y / I$$

onde o sinal negativo vem da convenção adotada para o sistema de coordenadas.

Esta teoria possui como premissas básicas duas hipóteses:

- Hipótese das seções planas. Diz que as seções, planas antes da deformação do material, permanecem planas após a deformação. Assim, para duas seções planas e paralelas, com a flexão elas permanecem planas, mas não mais paralelas. Esta hipótese tem como conseqüência uma distribuição linear de deformações na seção.

- Hipótese de material elástico linear. Acoplada com a anterior leva a uma distribuição de tensões linear ao longo da seção.

Assim, a equação da flexão elástica está baseada em distribuições lineares de deformação e tensão, o que implica que a sua abrangência está limitada pelo campo de validade da lei de Hooke, conseqüência da segunda hipótese. Considera-se na flexão plástica a mesma hipótese cinemática das seções planas, ou seja, a distribuição de deformações varia direta e linearmente com a distância ao eixo neutro.

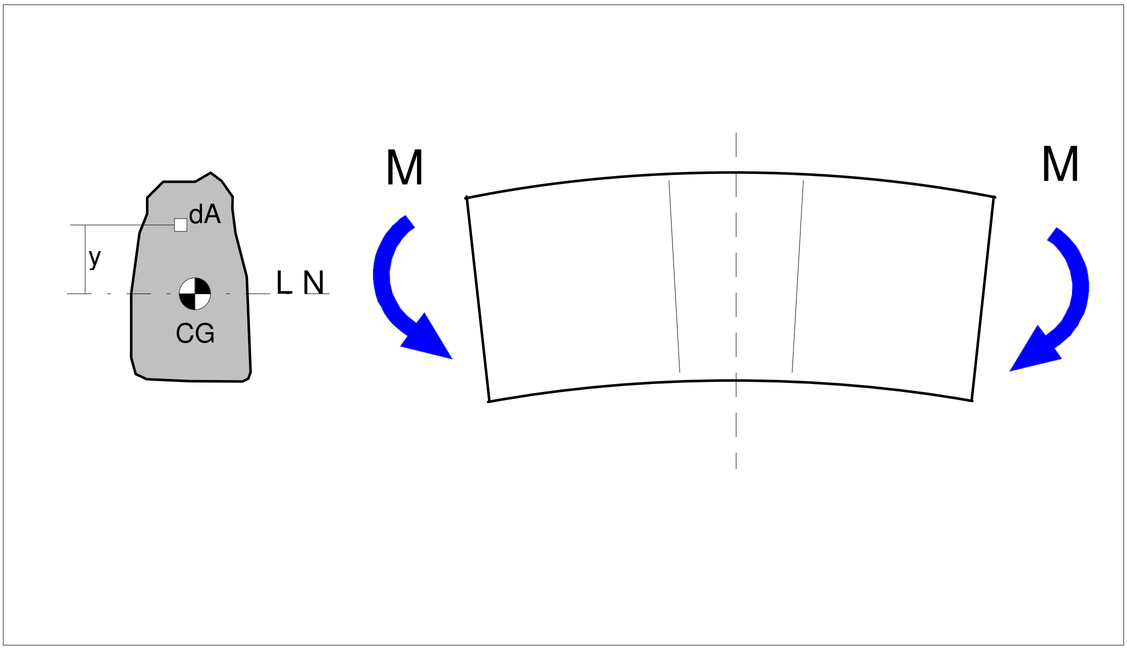

Figura 5.7 - Seção transversal de elemento sob flexão.

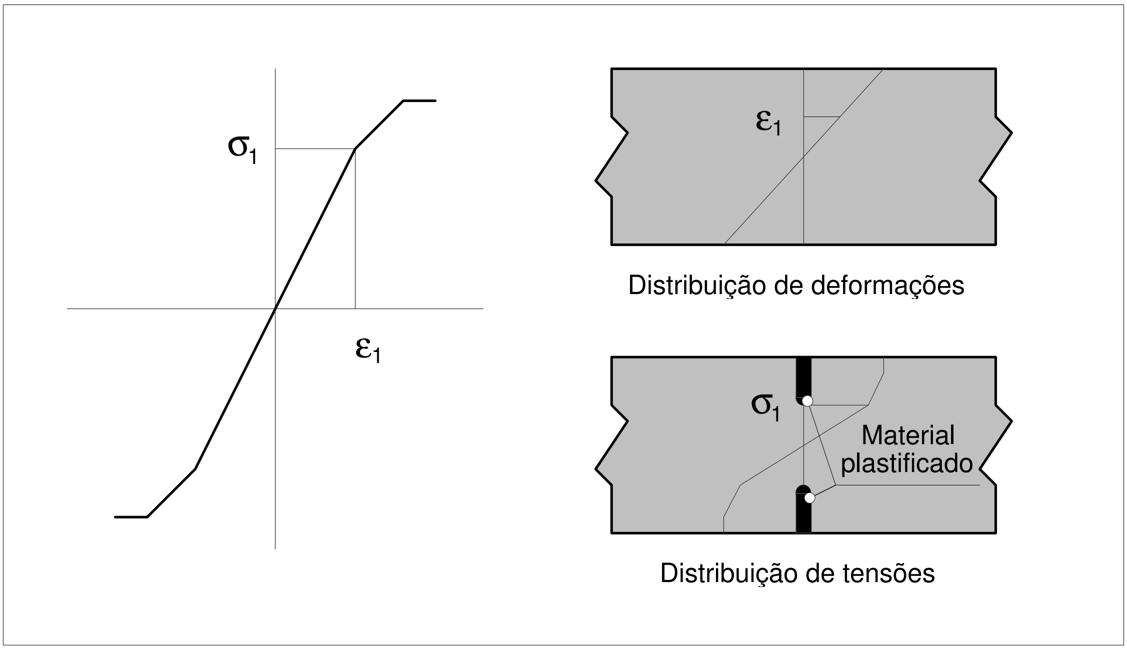

Figura 5.8 - Distribuição de tensões e deformações, para o caso de flexão plástica, bem como definição das demais variáveis.

Vamos considerar uma viga submetida a um momento fletor, segundo uma direção principal de inércia, para desenvolver a formulação que segue. Como a variação de deformações na seção transversal da barra é fixada pela premissa cinemática, a distribuição de tensões pode ser obtida pela curva tensão-deformação. Por exemplo, a uma deformação de tração ε_1, que ocorre em um ponto a uma distância y_1 da linha neutra, corresponde, no diagrama da figura 5.8, a uma tensão σ_1. De modo similar temos que para um ponto a uma distância y_2 ocorre uma deformação ε_2 e uma tensão σ_2. Tal é feito sucessivamente para todos os outros pontos da seção .

Como no caso de flexão elástica, as equações da estática também são usadas para a formulação da flexão plástica, estabelecendo as condições de equilíbrio:

$\Sigma F = 0$ ou $\int_A \sigma \, dA = 0$

$\Sigma M = 0$ ou $\int_A \sigma \, y \, dA = 0$

onde:

σ - Tensão normal, atuando na área dA;

y - Distância do eixo z à área dA.

Para uma seção qualquer, para resolver as equações anteriores é necessário um procedimento iterativo de tentativas e erros, já que a posição da linha neutra não é conhecida a priori. Devemos observar que o eixo neutro contém o centro de gravidade da seção apenas quando a seção transversal tem dois eixos de simetria e o diagrama tensão-deformação tem um comportamento simétrico na tração e na compressão.

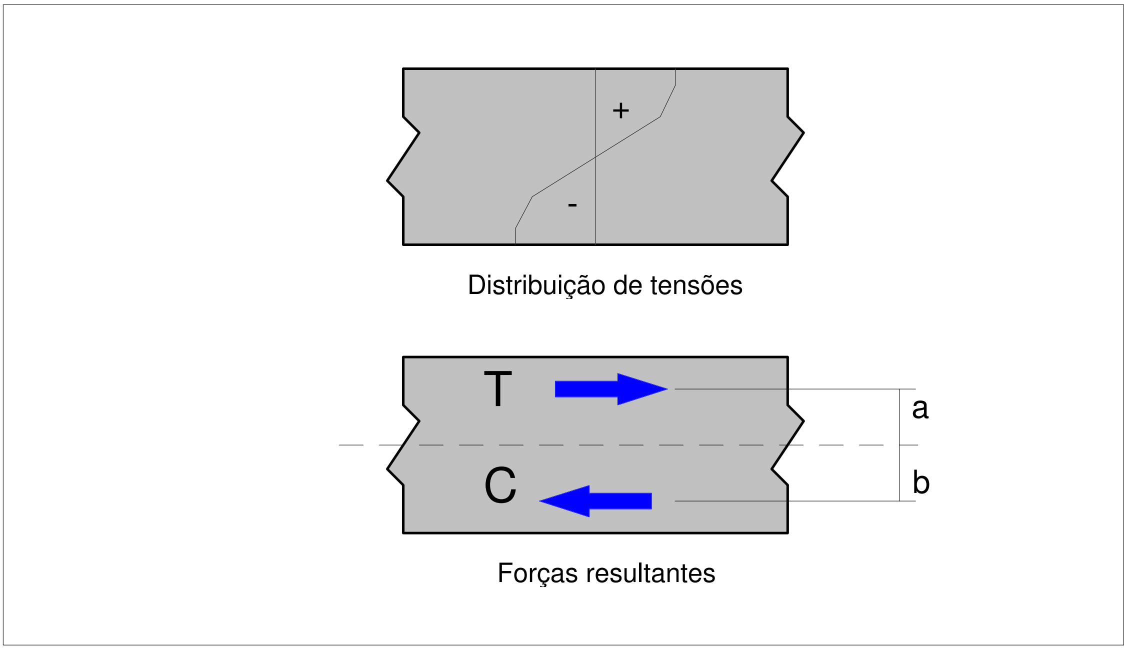

Figura 5.9 - Binário de forças internas na flexão.

Outra maneira de resolver o problema consiste em admitir uma distribuição de deformações, localizando assim um eixo provisório, resultando na distribuição de tensões da figura 5.8. Iterativamente a determinação das forças, para as tensões de tração (acima da linha neutra), e para as de compressão (abaixo da linha neutra), é feita até que a condição de equilíbrio seja satisfeita, isto é, Σ F = 0. Com a distribuição de tensões consegue-se determinar as forças resultantes T e C, localizadas por a e b, a partir da linha neutra, como mostra a figura 5.9. O momento resistente é calculado por T (a + b) ou C (a + b). Este processo é equivalente à integração da equação de equilíbrio de momentos e a convergência é alcançada quando T = C e T (a + b) = M. Este modo de cálculo é bastante trabalhoso e métodos mais rápidos para solução do problema foram desenvolvidos, porém o processo é interessante do ponto de vista didático, pois permite uma visualização do comportamento da viga em flexão, além do limite elástico.

O caso particular de uma viga de seção transversal retangular, formada por um material com diagrama tensão-deformação de mesmo comportamento na tração e na compressão, serve para fixar o mecanismo do comportamento plástico de uma barra sob flexão. Se a tensão σ_R corresponder à resistência de ruptura do material, conforme determinada no ensaio de tração, o momento fletor de ruptura pode ser determinado já que está associado à distribuição de tensões na viga. Para materiais que apresentem um comportamento quase linear até a ruptura, a distribuição de tensões apresenta poucas diferenças daquela prevista pela teoria da flexão elástica, porém se o diagrama tensão-deformação apresentar curvatura pronunciada, tal como o da figura anterior, a distribuição é bastante discrepante.

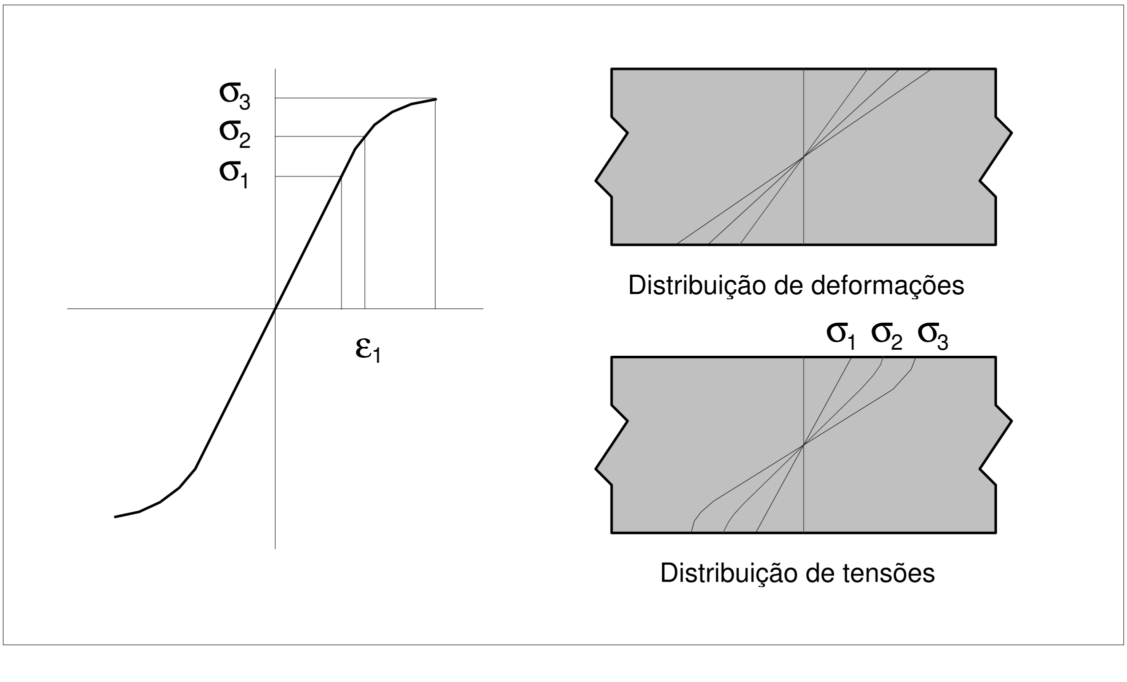

Figura 5.10 - Tensões de flexão em uma seção retangular.

Outro exemplo clássico de flexão plástica é mostrado na figura 5.11, para uma barra de material elasto-plástico ideal. Nesta figura temos ilustrado como a distribuição de tensões se altera conforme o carregamento externo de flexão é aumentado. Até o momento M_E, de início de escoamento, a distribuição é linear e logo todo o material está no regime elástico. Quando é atingido M_E pela primeira vez, a tensão limite de escoamento é atingida na seção crítica. Para qualquer aumento no esforço de flexão ocorre agora, necessariamente, uma plastificação que inicia nas fibras externas do material, penetrando para o seu interior conforme a carga aplicada cresce. Como o material é considerado elasto-plástico ideal, a distribuição de tensões é constante na zona plastificada e logo qualquer aumento de carga só pode ser equilibrado por um aumento da zona plastificada, fazendo portanto com que esta penetre mais no material. A situação limite ocorre quando toda a seção atinge a tensão limite de escoamento e logo a viga não possui mais capacidade de suportar qualquer aumento de carga. Nesta situação temos que o momento aplicado atinge o chamado momento de plastificação, que é a máxima carga possível de ser suportada pela peça, pois todos os pontos da seção transversal já atingiram a tensão limite de escoamento e portanto não existe mais material elástico que possa ter a sua tensão elevada, para equilibrar um aumento de carga.

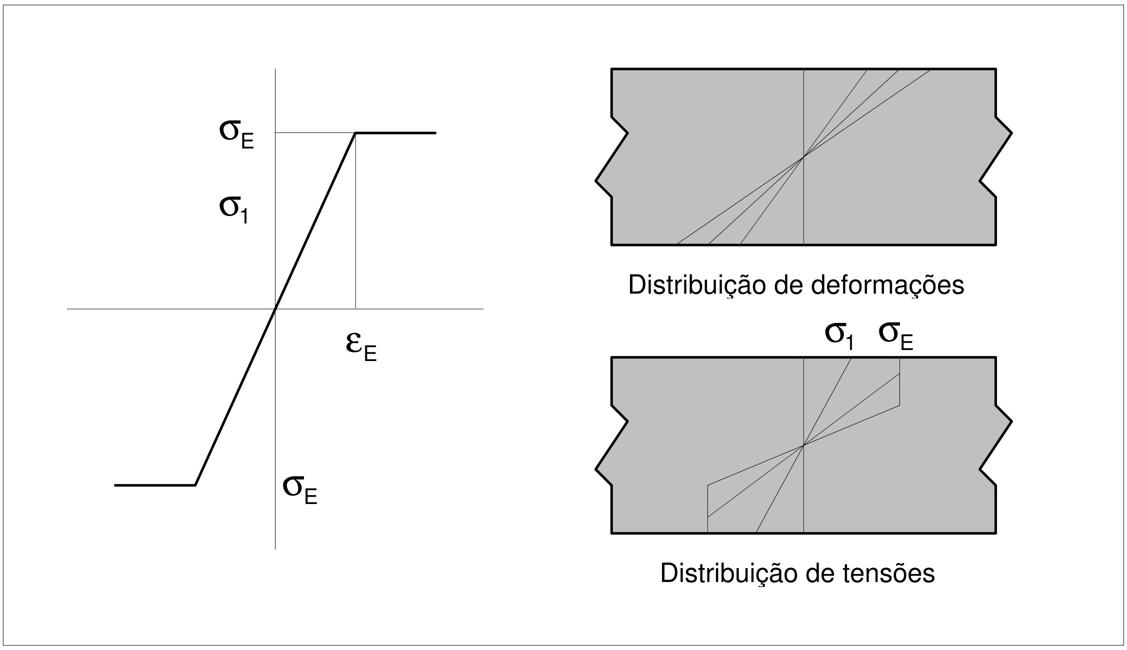

Figura 5.11 - Tensões de flexão para um material elasto-plástico ideal.

5.4 - FATOR DE FORMA

No estudo do comportamento plástico de peças e componentes estruturais, uma hipótese normalmente feita quanto à relação constitutiva do material (relação tensão-deformação) é de que o material possui um comportamento elasto-plástico ideal, portanto sem encruamento, ficando a tensão igual à σ_E durante toda a região de comportamento plástico, como mostra a figura 5.11. Para ilustrar o procedimento vamos considerar uma viga de seção retangular submetida à flexão pura. O momento resistente é dado por

$$M = 2 \int \sigma \, b \, y \, dy \tag{5.13}$$

Esta expressão será particularizada para o ponto de início de escoamento e para o ponto de plastificação total da seção.

COMPORTAMENTO ELÁSTICO, NO PONTO DE INÍCIO DE ESCOAMENTO

Aqui vamos considerar que o material tem um comportamento perfeitamente elástico e que a tensão na fibra mais solicitada é igual à tensão limite de escoamento do material, obtida no ensaio de tração.

Da geometria da distribuição de tensões temos $\sigma / y = \sigma_E / (h / 2)$ e logo, $\sigma = \sigma_E \, y / (h / 2)$. Assim, $M = 4 \, b \, \sigma_E / h \int y^2 \, dy = \sigma_E \, b \, h^2 / 6$ ou,

$$M_E = \sigma_E \, b \, h^2 / 6 \tag{5.14}$$

ou ainda, $M_E = \sigma_E \, W_f$ onde W_f é o módulo de resistência à flexão da seção da viga e M_E é o momento de início de escoamento, que é produzido pela carga para a qual pela primeira vez é atingida a tensão limite de escoamento.

PLASTIFICAÇÃO TOTAL DE UMA SEÇÃO TRANSVERSAL RETANGULAR

Agora vejamos o caso limite de plastificação total da seção transversal, quando todos os pontos escoaram, levando a uma distribuição de tensões como a ilustrada na figura 5.13. Esta situação corresponde à máxima carga que pode ser suportada pela viga, pois não existe maneira de um aumento do momento interno, dado pela distribuição de tensões ao longo da seção transversal. Para o caso de um material sem encruamento, e usando a equação (5.13), vem

$$M_P = 2 \int \sigma_E \, b \, y \, dy$$

$$M_P = \sigma_E \, bh/4 \tag{5.15}$$

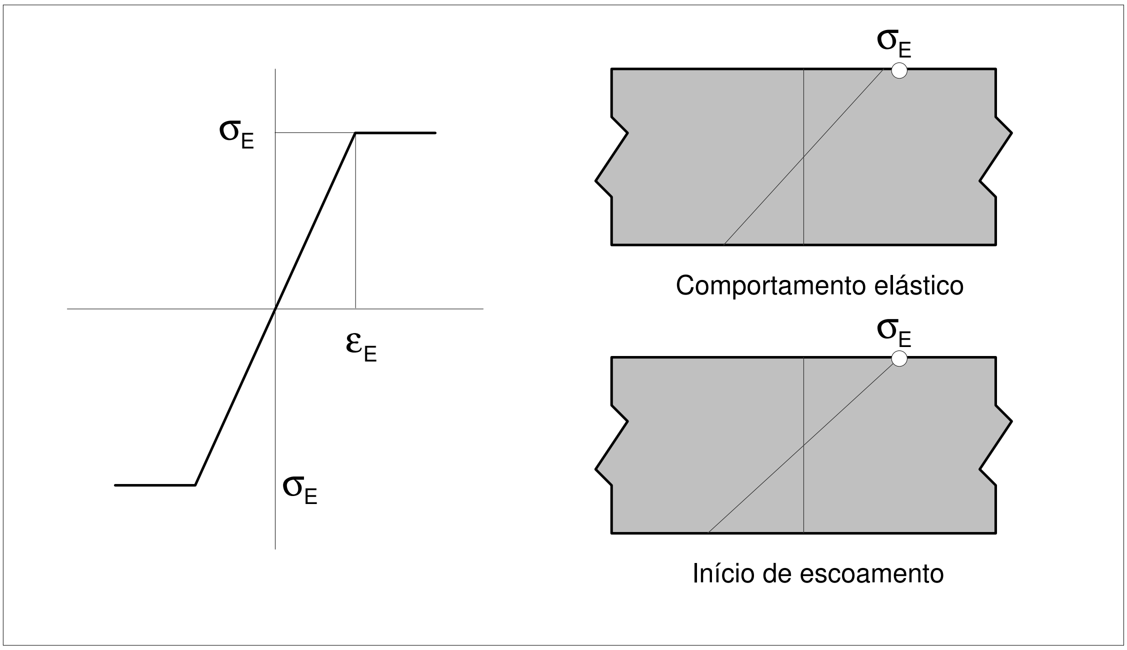

Figura 5.12 - Tensões de flexão no início da plastificação.

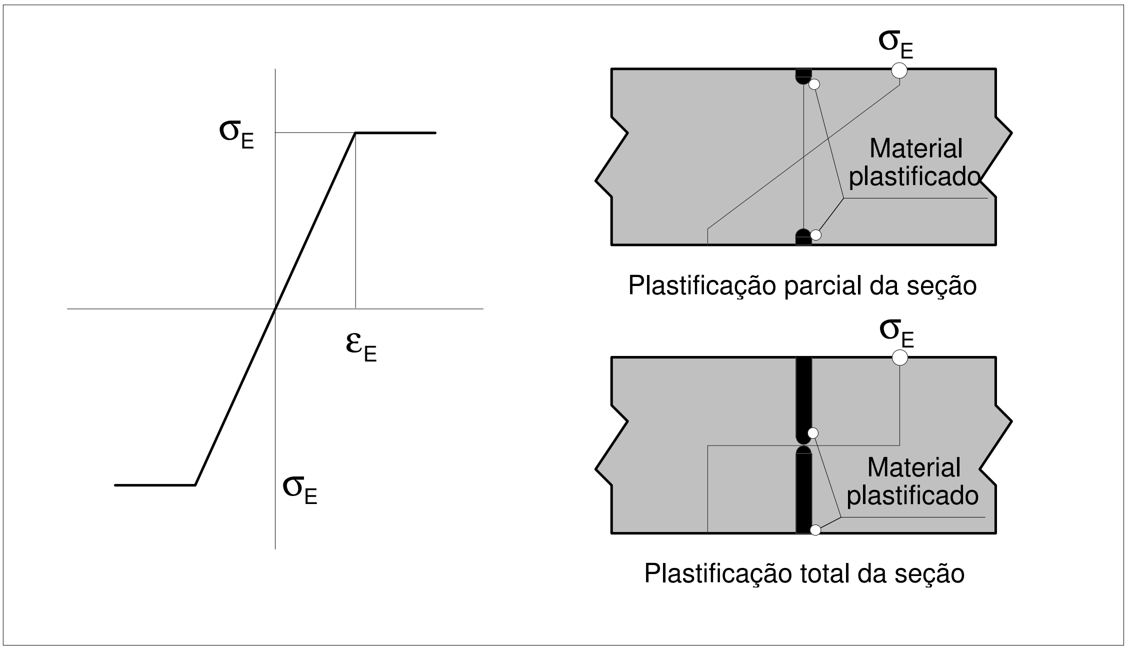

Figura 5.13 - Distribuição de tensões na plastificação total da seção.

O momento M_P é a carga de plastificação, que corresponde ao momento para a qual todos os pontos da seção estão dentro do regime plástico. É a carga máxima que a seção pode suportar, num material sem encruamento. No início de escoamento temos $M_E = \sigma_E W_f$, logo a relação entre a carga de início de escoamento e a de plastificação é:

$$M_P = k\, M_E \tag{5.16}$$

onde k é denominado de fator de forma, já que depende única e exclusivamente da forma da seção transversal considerada, dentro da hipótese de um material elastoplástico ideal. Para o caso da seção retangular analisada, temos

$$k = 1{,}5$$

ou seja, o momento necessário para plastificar toda a seção é 50% maior do que para o requerido para o início de escoamento. É conveniente salientar que, para que a viga possa suportar todo o momento M_P, é necessário que o material possua dutilidade suficiente, de modo a permitir a plastificação de toda a seção, pois caso contrário podemos ter o início da ruptura com uma carga inferior à carga de plastificação. O fator de forma depende do tipo de seção transversal, e a tabela abaixo apresenta os valores para algumas das seções mais empregadas em problemas estruturais.

TABELA 5.3

Fator de forma para algumas seções, para flexão e torção.

Tipo de seção	Flexão	Torção
Seção retangular	1,5	-
Seção circular	1,7	1,33
Seção losangular	2,0	-
Viga tipo I	1,06 a 1,18	-

Basicamente o fator de forma cresce quando aumenta a fração de material próximo à linha neutra, fazendo com que M_P seja muito maior que M_E , como no caso de uma seção losangular. O inverso ocorre com uma seção do tipo I, onde o material está concentrado longe da linha neutra. Neste caso, mal iniciado o escoamento, já temos plastificada uma grande parcela da seção transversal, restando pouco material, ainda elástico, no interior da seção para suportar novos acréscimos de carga. Isto tem como resultado um baixo fator de forma, onde M_P é apenas ligeiramente superior a M_E.

Por outro lado, é lógico que, quanto à flexão elástica, uma seção do tipo I é muito mais resistente, por apresentar um momento de inércia maior, porém uma vez iniciado o escoamento neste tipo de seção, rapidamente atingimos a carga de plastificação, devido ao baixo valor de k. Para uma seção tubular a figura 5.14 mostra o fator de forma em função do tipo de carregamento. É importante salientar que a equação

(5.16) é válida apenas para situações onde a seção transversal é constante, sem efeitos de concentração de tensões, pois estes afetam a carga de início de escoamento, conforme deduzido acima, na obtenção do valor de 1,5 para a seção retangular. Assim, para o cálculo da carga de início de escoamento o efeito de concentração de tensões é importante e deve ser usado, mas para a determinação da carga de plastificação este não tem efeito, não sendo considerado. O fator de forma, como definido, pela relação entre carga de plastificação e a carga de início de escoamento, seria afetado pelo fator de concentração de tensão. Assim, o fator de forma na realidade vale somente para o caso onde K_t é unitário, ficando a relação entre a carga de plastificação e a de início de escoamento, no caso com concentração de tensao, dada pelo produto $k \cdot K_t$.

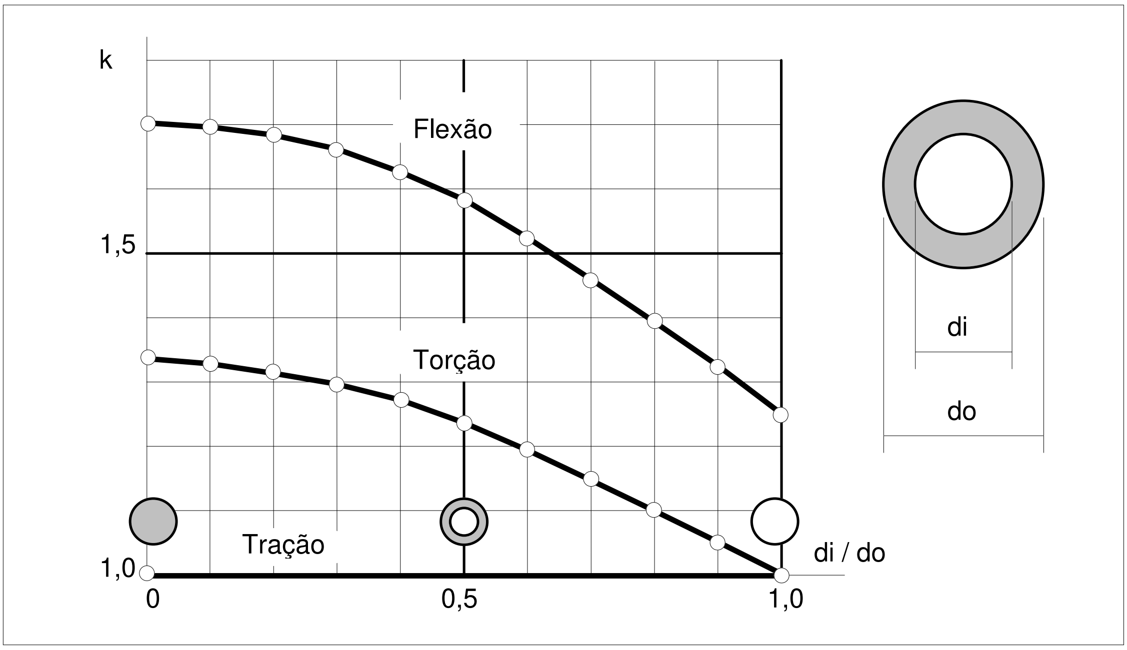

Figura 5.14 - Fator de forma para seções circulares vazadas.

5.5 - FLEXÃO COM PLASTIFICAÇÃO PARCIAL DA SEÇÃO

Para uma plastificação parcial da seção transversal, em uma viga de seção retangular constituida de um material elasto-plástico ideal, o momento aplicado pode ser obtido como segue. A figura 5.15 mostra a distribuição de tensões para uma seção parcialmente plastificada, quando o material é elasto-plástico ideal. A região plastificada da seção penetra uma profundidade c no material, onde a tensão é constante e igual a tensão de escoamento. No núcleo, ainda elástico, a tensão possui uma distribuição linear, desde zero sobre a linha neutra, até a tensão de escoamento na interface elasto-plástica. Podemos decompor o momento externo aplicado em duas partes, uma equilibrada pela distribuição de tensões da região que escoou, e outra equilibrada pela distribuição elástica, na parte interna.

$M = M_1 + M_2$

$M_1 = (\sigma_E \, b \, c) (h - c)$

$M_2 = \sigma_E \, b (h - 2c)^2 / 6$

sendo M_1 o momento da parte plástica da distribuição de tensões e M_2 o momento da parte elástica da distribuição de tensões.

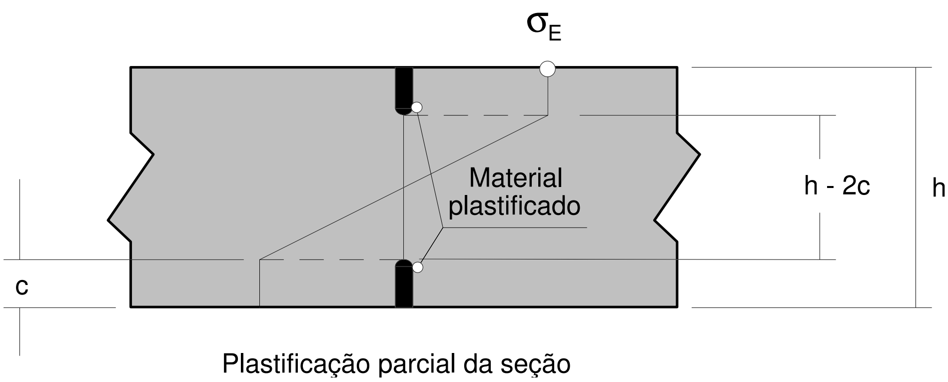

Figura 5.15 - Seção parcialmente plastificada.

Executando a soma dos momentos chega-se a:

$$M = \sigma_E W_f [1 + 2 (c / h) - 2 (c / h)^2]$$

Denominando a relação c / h de ξ, ou seja, é a razão entre a altura do material plastificado e a altura total da seção, figura 5.15, portanto variável desde 0 até 0,5, correspondendo respectivamente desde um comportamento elástico até um comportamento plástico total, tem-se logo $M = \sigma_E W_f (1 + 2 \xi - 2 \xi^2)$ e como $M_E = \sigma_E W_f$, resulta

$$M / M_E = (1 + 2 \xi - 2 \xi^2) \qquad (5.17)$$

com a condição de que $M > M_E$.

Quando é conhecido o momento M aplicado e se deseja saber a profundidade plastificada, o resultado pode ser obtido pela solução da equação do segundo grau, derivada da equação anterior,

$$\xi^2 - \xi + 0{,}5\,(M / M_E - 1) = 0$$

cuja solução fornece

$$\xi = [\,1 - (\,1 - 2\,(\,M / M_E - 1)\,)^{1/2}\,] / 2 \qquad (5.18)$$

com a condição de que ξ esteja no intervalo (0; 0,5), já que só uma raiz satisfaz o limite físico de plastificação total.

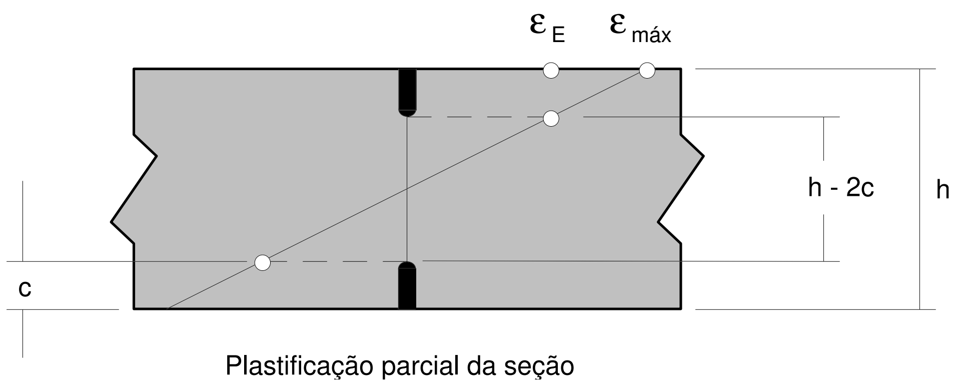

Figura 5.16 - Determinação da deformação máxima.

Conhecendo a profundidade plastificada, é possível obter a deformação na fibra externa, pois a deformação na profundidade c é igual a e , desde que permaneça válida a hipótese de uma distribuição linear de deformações ao longo da seção. Sendo assim, as equações, desenvolvidas a seguir, permitem determinar a deformação máxima na fibra mais externa. Por semelhança de triângulos, da distribuição de deformações, $\varepsilon_{máx} / (\,h / 2\,) = \varepsilon_E / (\,h / 2 - c\,)$ ou

$\varepsilon_{máx} / \varepsilon_E = [\ 1 - 2\ \xi\ ]^{-1}$

onde ξ = c/h. Substituindo na equação anterior resulta

$$\varepsilon_{máx} / \varepsilon_E = [1 - 2\ (\ M / M_E - 1]^{-1/2} \tag{5.19}$$

A tabela 5.4 mostra a evolução de ξ e de $\varepsilon_{máx} / \varepsilon_E$ à medida que a relação M / M_E cresce, desde 1 até 1,5, para uma seção retangular, ou seja, do início de escoamento até a plastificação total da seção.

TABELA 5.4

Evolução da profundidade plastificada e da deformação máxima.
Viga de seção retangular.

M / M_E	ξ	$\varepsilon_{máx} / \varepsilon_E$	M / M_E	ξ	$\varepsilon_{máx} / \varepsilon_E$
1,000	0,000	1,000	1,450	0,342	3,162
1,100	0,053	1,118	1,460	0,359	3,536
1,200	0,113	1,291	1,470	0,378	4,082
1,250	0,146	1,414	1,480	0,400	5,000
1,300	0,184	1,581	1,490	0,429	7,071
1,350	0,226	1,826	1,495	0,450	10,000
1,400	0,276	2,236	1,498	0,468	15,811
1,420	0,300	2,500	1,499	0,478	22,361
1,440	0,327	2,887	1,500	0,500	⇨ ∞

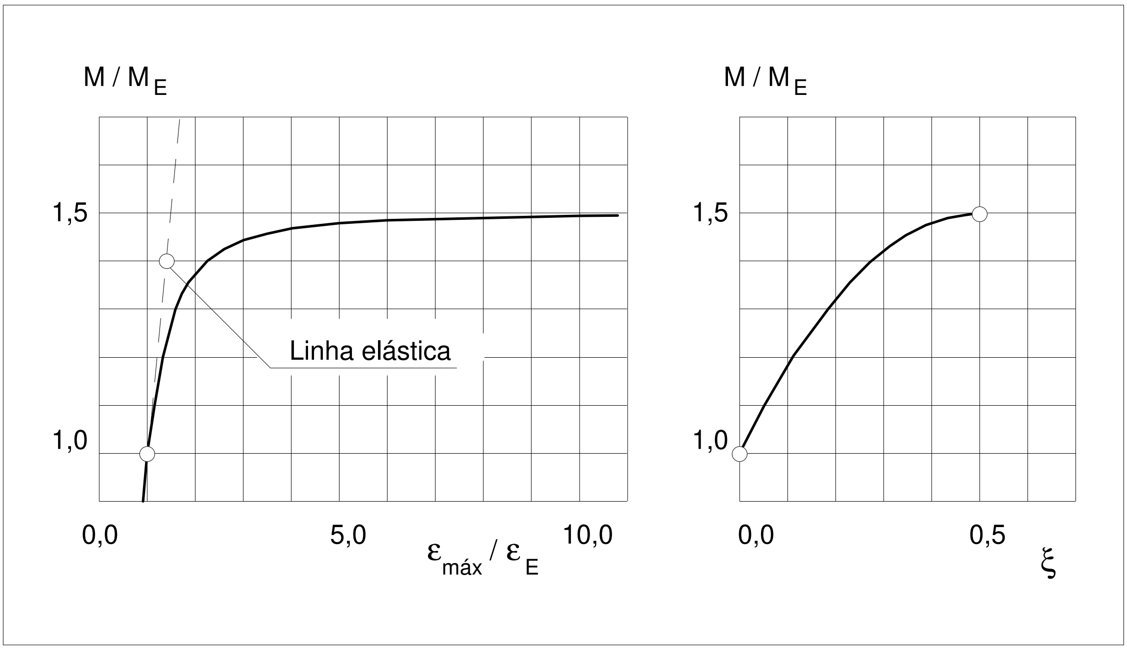

Figura 5.17 - Variação de M / M_E em relação a variação de $\varepsilon_{máx} / \varepsilon_E$ e ξ, para uma viga com seção retangular.

A figura 5.17 ilustra que conforme M ultrapassa M_E, e se aproxima de M_P, as deformações e deslocamentos passam a aumentar mais rapidamente do que no caso elástico, conforme mostra a curva M / M_E $\varepsilon_{máx} / \varepsilon_E$. Para $M = M_P$, temos o limite $\varepsilon_{máx} \Rightarrow \infty$, e a seção não tem mais condições de suportar qualquer acréscimo de carga e a curvatura tende a infinito. Assim, a viga age como uma rótula na seção escoada, dobrando sob a ação do momento M_P, como a figura 5.18 ilustra.

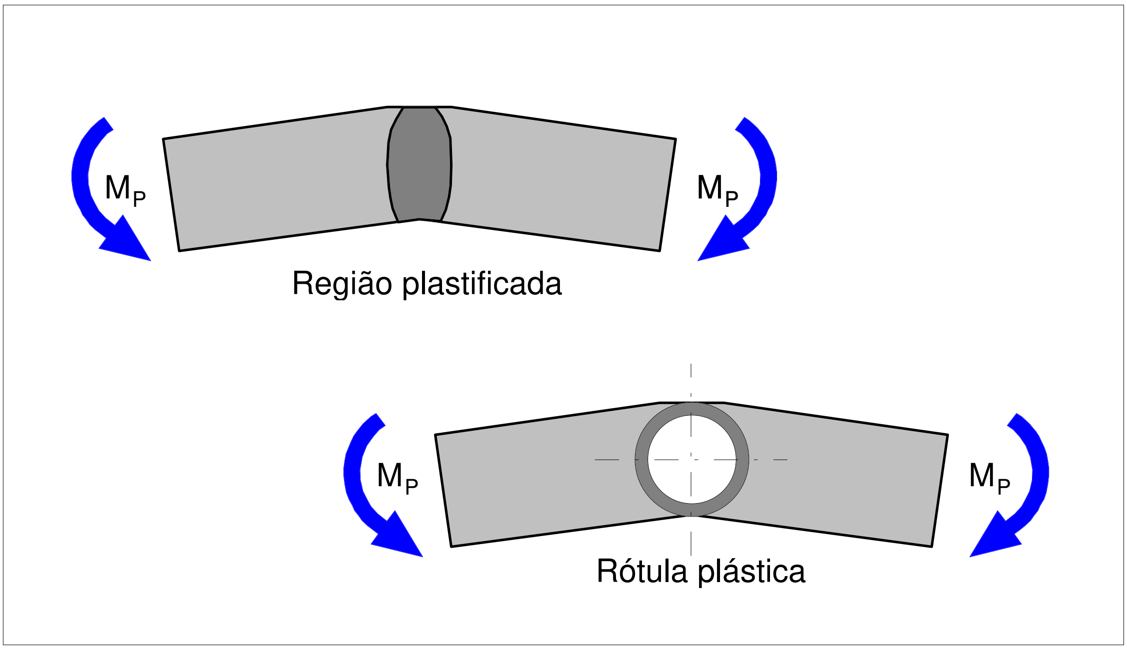

Figura 5.18 - Representação da rótula plástica de uma barra submetida a flexão, sob ação do momento M_P.

5.6 - DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES RESIDUAIS

Quando a carga de flexão é aliviada, o material se comporta linearmente, ou seja, é elástico durante a descarga e devido às deformações plásticas, previamente existentes, fica uma curvatura residual. Esta situação final corresponde a um estado deformado da viga e dentro do material fica um estado de tensões e deformações residuais. Como a viga está descarregada e em equilíbrio, a distribuição de tensões deve também estar em equilíbrio, tanto de forças como de momentos, pois caso contrário teríamos uma resultante não nula agindo, o que violaria o equilíbrio.

O estado de tensões residuais pode ser determinado considerando que, após o material ter escoado, quando do carregamento, durante a descarga o material passa a ter um comportamento perfeitamente elástico, como pode ser visto na figura 3.4. Esta descarga é elástica, desde que a tensão de descarga não ultrapasse a duas vezes a tensão limite de escoamento, pois caso contrário o material escoará agora sob compressão, quando do fim da descarga. Assim, a distribuição de tensões resultante da descarga, imaginada agindo isoladamente, pode ser considerada como uma distribuição de tensões de um material com uma tensão limite de escoamento igual a duas vezes a tensão limite de escoamento do material real. De um modo geral, a descarga pode ser imaginada como um carregamento simétrico ao aplicado, assumindo, agora, um material com comportamento elástico.

No caso da flexão plástica a descarga pode ser pensada como a soma de um momento, de igual magnitude, mas de sinal oposto ao do carregamento. A distribuição de tensões do primeiro momento, o de carregamento, é a distribuição de um material elastoplástico ideal e a do segundo é a distribuição linear correspondente à descarga elástica que o material sofre. Desta forma é possível obtermos as tensões e deformações residuais na seção da viga. Vamos considerar que M_1 é o momento que plastifica parte da seção, com a condição de que

$$M_E < M_1 < M_P \tag{5.20}$$

sendo M_E o momento de início de escoamento, M_1 o momento externo aplicado e M_P o momento de plastificação total da seção.

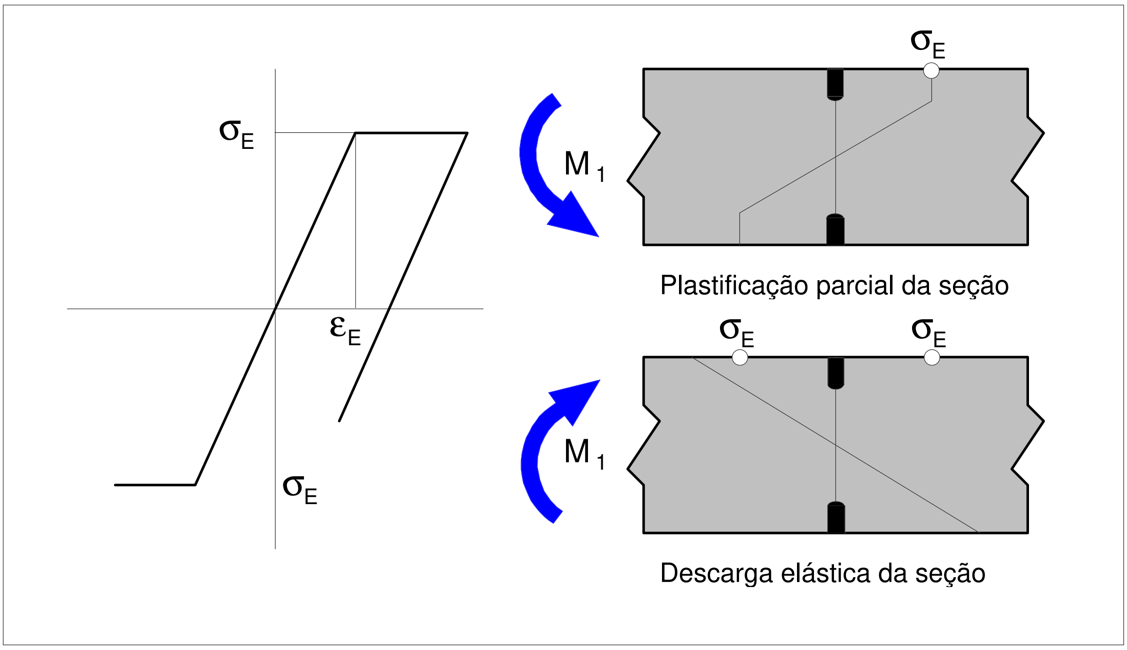

Figura 5.19 - Tensões da flexão em carga e descarga.

Para determinar o estado de tensões e deformações residuais, devemos sobrepor os campos de tensões e de deformações, devido ao carregamento, com comportamento elasto-plástico, com o devido à descarga, de comportamento elástico. O campo de tensões e de deformações quando da descarga é obtido adotando um carregamento de sinal oposto ao que atua na peça, presumindo um comportamento puramente elástico do material. Sendo **E** o estado de tensões e deformações, esquematicamente é possível escrever:

$$\mathbf{E}_{\text{ESTADO RESIDUAL}} = \mathbf{E}_{\text{ESTADO ELASTOPLÁSTICO}} - \mathbf{E}_{\text{ESTADO NA DESCARGA ELÁSTICA}}$$

ou seja, o estado de tensões e deformações residuais, obtido após a descarga completa, é igual ao estado devido ao comportamento real que o material apresenta (elastoplástico), sobreposto ao estado de tensões e deformações devido à descarga, considerada elástica.

Assim, no caso da flexão plástica, a descarga é caracterizada por um momento M_1, de igual intensidade ao aplicado, porém de sinal oposto, agindo sobre um material elástico. Isto implica que a tensão máxima do momento de descarga é maior que a tensão máxima que ocorre no momento de início de plastificação, como é ilustrado no diagrama da figura 5.19. A superposição dos dois campos de tensão está representada na figura 5.20, mostrando a distribuição resultante de tensões residuais.

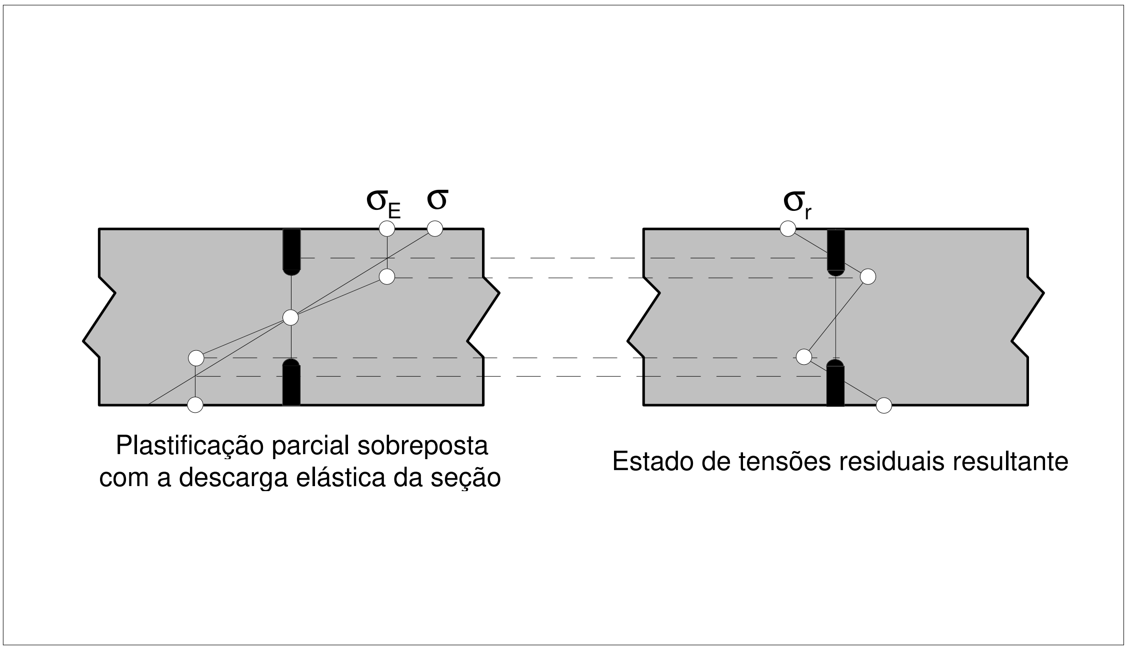

Figura 5.20 - Estado de tensões residuais, após a descarga do momento.

A tensão residual que fica na fibra externa, designada σ_r, que é a máxima da seção, vale:

$$\sigma_r = \sigma_E - \sigma \qquad (5.21)$$

sendo σ a tensão da descarga elástica, calculada como $\sigma = M_1 / W_f$, e logo,

$$\sigma_r = \sigma_E - M_1 / W_f$$

Desta forma, como $M_1 < M_P$, a tensão residual máxima, em módulo, na seção fica limitada a

$$|\sigma_r| < (k - 1)\,\sigma_E \qquad (5.22)$$

onde k é o fator de forma. A deformação residual, ε_r, é de igual sinal ao do carregamento imposto, como a figura 5.21 ilustra.

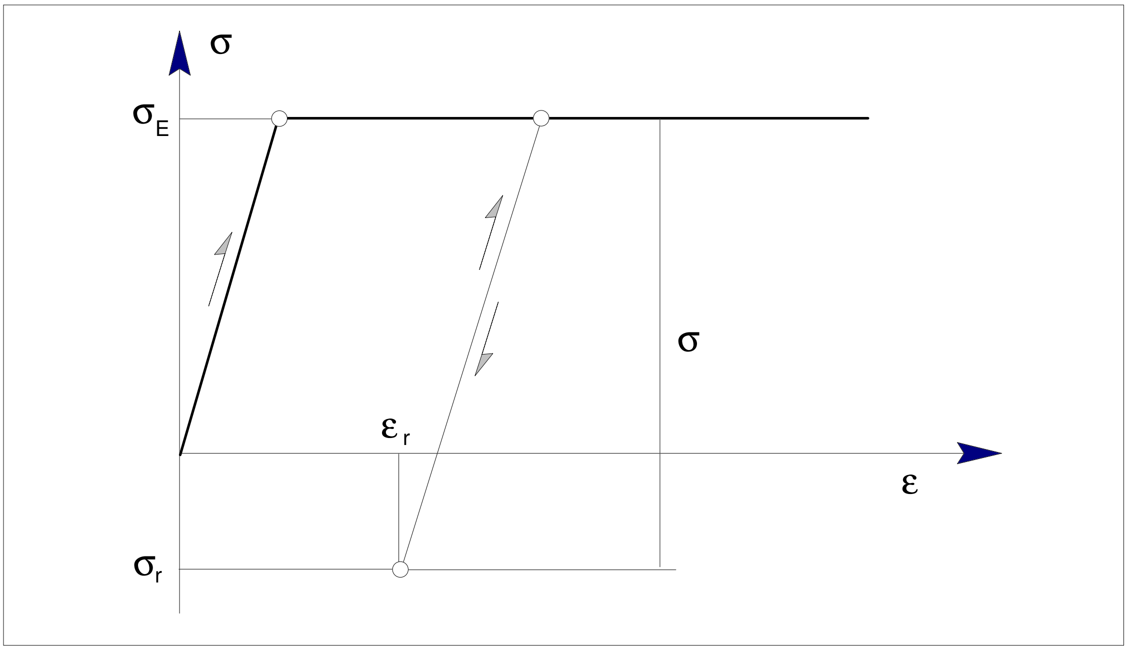

Figura 5.21 - Descarga do material, com o estado residual σ_r e ε_r.

Em uma nova aplicação de carga, o material vai ter uma solicitação que é agora a superposição do campo de tensões residuais com o provocado pelo momento atuante, digamos M_2. Se $M_2 < M_1$, o material se comportará elasticamente. Se $M_2 > M_1$, então ocorre uma nova plastificação, reduzindo a quantidade de material elástico na seção. Esta nova plastificação leva a um aumento nas deformações residuais no material, bem como nas tensões residuais que se desenvolvem.

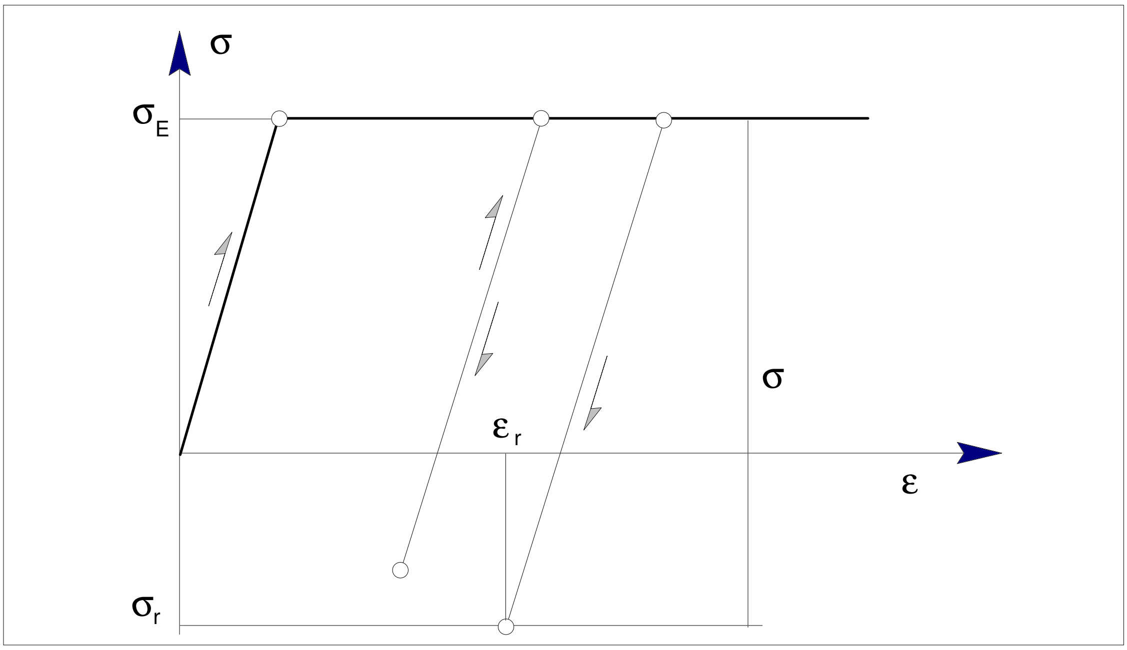

Figura 5.22 - Efeito de uma nova carga, maior que a anterior, sobre σ_r e ε_r..

5.7 - ESCOAMENTO COM CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

O mesmo raciocínio descrito na seção anterior pode ser usado para determinar o estado de tensões e deformações residuais em qualquer peça mecânica, independente do tipo de carregamento. Mantendo a hipótese de um comportamento elastoplástico ideal, a tensão no ponto crítico mantém-se igual ao valor da tensão limite de escoamento. A tensão residual será obtida somando à tensão limite de escoamento a tensão calculada elasticamente, aplicada pela descarga. Para o caso de peças com pontos de concentração de tensão, a tensão no ponto crítico é obtida usando o fator de concentração de tensão, caso estejamos no regime elástico, e portanto a tensão residual será nula, já que não ocorre escoamento. Mas, se σ_0 é a tensão nominal devida ao carregamento aplicado, ocorrendo escoamento no fundo do entalhe, a tensão residual quando da descarga será

$$\sigma_r = \sigma_E - \sigma_0 K_t \qquad (5.23)$$

Se o campo de tensões fornecer no ponto crítico uma tensão elásticamente calculada, σ_{el}, tal que $\sigma_{el} = \sigma_0 K_t < 2\,\sigma_E$, quando da descarga não ocorre nova plastificação, sob compressão. No caso de $\sigma_{el} = \sigma_0 K_t > 2\,\sigma_E$, ocorre uma nova plastificação na descarga, com alteração no campo de tensões quando da descarga. Neste caso o escoamento é sob compressão e vem que

$$\sigma_r = -\sigma_E \tag{5.24}$$

como ilustra a figura 5.24,que mostra a distribuição de tensões durante a carga e a descarga, bem como a distribuição de tensões residuais.

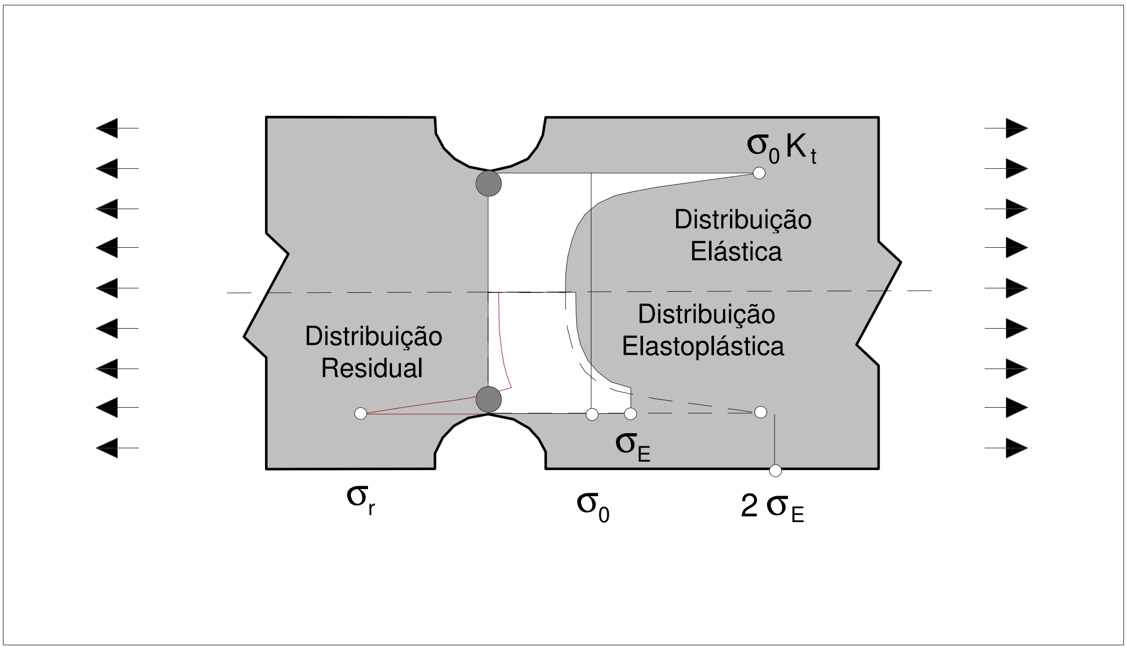

Figura 5.23 - Tensões residuais em uma região de concentração de tensão.

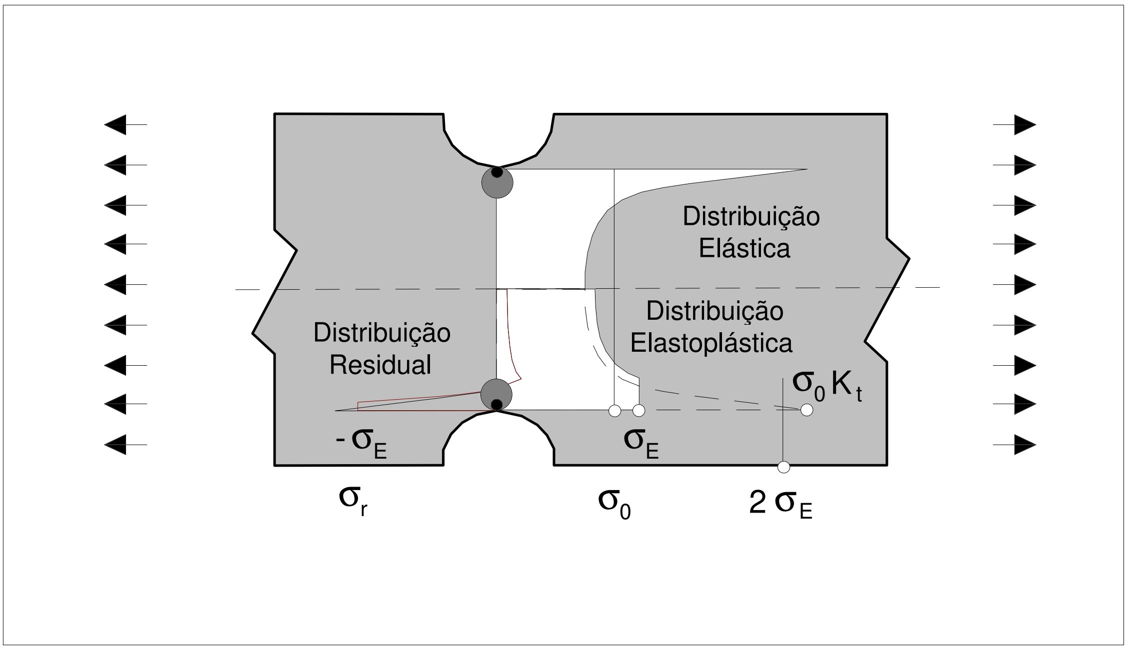

Figura 5.24 - Distribuição de tensões residuais com escoamento na descarga.

EXEMPLO 5.1

Determinar a tensão e deformação residual na fibra mais externa para uma viga de seção retangular submetida a um momento fletor que plastifique 50% da altura da seção, bem como M_E e M_P. As características da seção transversal e do carregamento são dados a seguir. O material é um aço SAE-ABNT 1018 com as seguintes propriedades:

E = 210 000 MPa

$\sigma_E =$ 220 MPa

SOLUÇÃO:

Conforme visto anteriormente, para uma seção retangular as cargas sob flexão para início de escoamento e de plastificação são:

$M_E = \sigma_E\, b\, h / 6 \quad M_E = 73{,}3$ kNm

$M_P = \sigma_E\, b\, h / 4 \quad M_P = 110$ kNm

Para a plastificação de parte da altura da seção, o momento aplicado, segundo (5.17),

$M = M_E\,(1 + 2\,\xi - 2\,\xi^2)$

e para plastificação de 50% da seção tem-se c = 50 mm. Assim, ξ = 1/4 e logo, substituindo,

$M = M_E\,(1 + 2\,(1/4) - 2\,(1/4)^2)$

M = 100,83 kNm

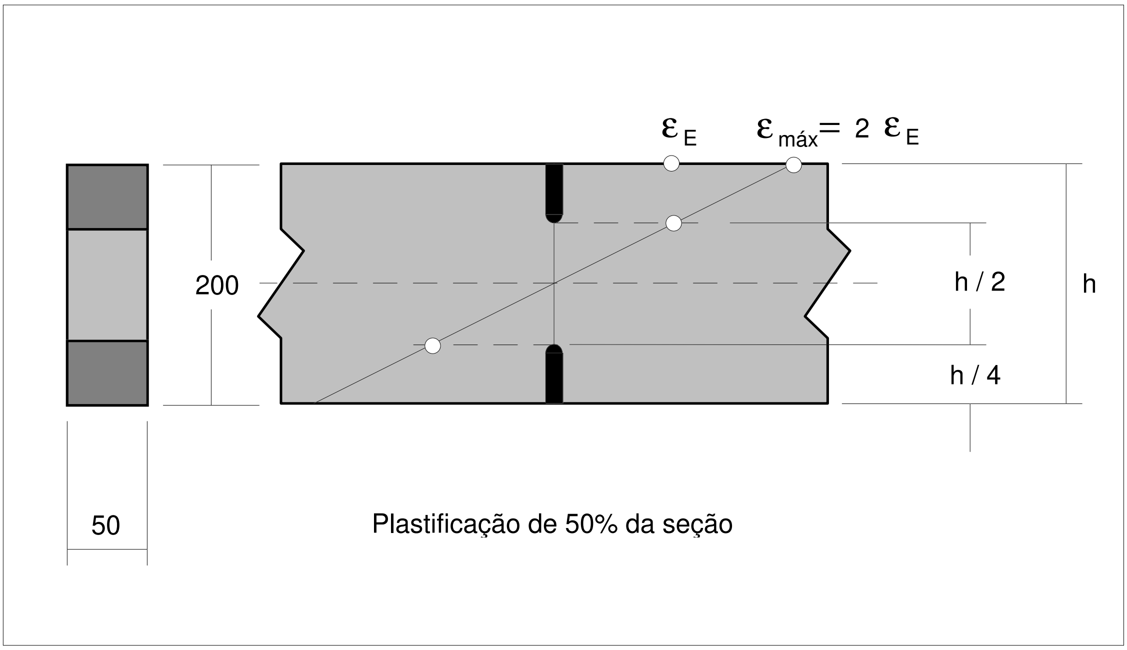

Figura 5.25 - Geometria do exemplo 5.1 e distribuição de deformações com plastificação parcial.

A tensão residual é

$\sigma_r = \sigma_E - M / W_f$

onde

$W_f = 333333$ mm

logo

$\sigma_r = - 82,5$ MPa

A deformação residual é calculada a partir da deformação na fibra externa, quando do carregamento, que no caso vale $2\,\varepsilon_E$, menos a deformação elástica da descarga.

$\varepsilon_E = 0,00105$

$2\,\varepsilon_E = 0,00210$

$\varepsilon_r = \varepsilon - \varepsilon_{elástico}$

$\varepsilon_r = 0,00066$

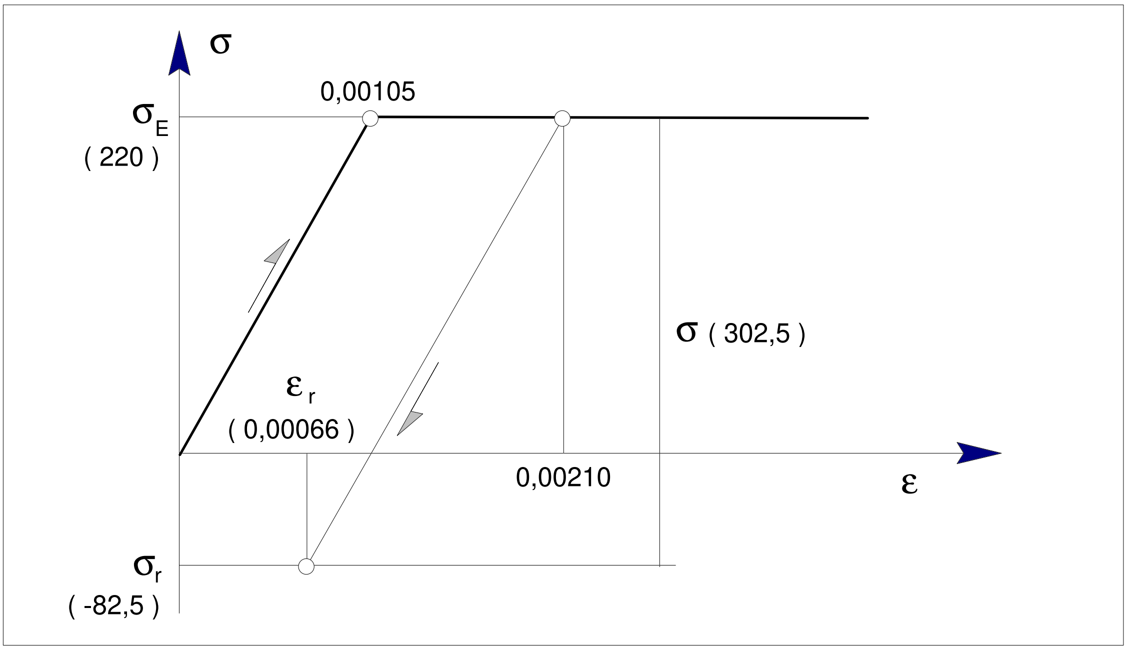

Figura 5.26 - Carga e descarga da peça do exemplo 5.1.

A carga de plastificação da seção, anteriormente determinada, não representa ainda, em muitos casos, o limite máximo da capacidade da peça suportar carga, mesmo sem considerar qualquer encruamento que o material venha a apresentar. Esta capacidade de suportar carga além de F_P, ou M_P, ocorre em componentes que possuem pontos com concentração de tensão, onde justamente nas seções onde estão estes pontos temos uma redistribuição de tensões, que pode levar ao surgimento de um estado triaxial de tensões. Nesta situação, passa a existir uma restrição à deformação plástica do material, ou seja, é necessária uma tensão maior do que a tensão limite de escoamento para que o material venha a escoar efetivamente. Este aumento de tensão, para atingir a condição de plastificação completa da seção, tem como consequência um aumento na carga de colapso plástico, acima de F_P ou M_P. Esta nova carga limite de colapso plástico é chamada simplesmente de carga limite e é denotada por F_L ou M_L. Nesta análise continuamos ainda considerando o material como elastoplástico ideal, sendo detalhada no Apêndice 7.

5.8 - TENSÕES PRIMÁRIAS, SECUNDÁRIAS E DE PICO

Com o desenvolvimento de técnicas de análise de tensões mais refinadas, tanto analíticas como experimentais, é possível determinar as tensões que ocorrem no material com bastante precisão. Quando o campo de tensões é plenamente conhecido, podemos usar uma tensão admissível mais elevada que quando apenas uma tensão nominal é conhecida. Por outro lado a tensão máxima na seção considerada não é um critério adequado para uma análise de segurança. Um valor pontual de tensão tem pouco significado, a menos que esteja definida também a sua localização, distribuição ao longo da seção e tipo de carga que solicita o material. Diferentes tipos de tensões possuem significados diversos e logo os valores admissíveis serão também diferentes. Assim, a tensão que age em uma barra de seção uniforme tracionada deve ser mantida, comparativamente, abaixo da tensão que atua no fundo do entalhe em uma outra barra. Para uma tensão de origem térmica podemos admitir que venha a atingir um valor bem maior do que uma tensão que é provocada por peso próprio ou pela pressão interna em um reservatório.

Alguns dos possíveis modos de falha de um componente estrutural, como discutidos no Capítulo 2, são:

- Deformação elástica excessiva (flambagem);
- Deformação plástica excessiva (distorção);
- Ruptura frágil;
- Fluência;
- Deformação plástica progressiva (incremental);
- Fadiga;
- Corrosão;
- Corrosão sob tensão;
- Fadiga sob corrosão.

Tratando com estes modos de falha, partimos da hipótese de que é conhecido o campo de tensões no componente. Isto pode ser obtido, seja analítica, seja experimentalmente. Uma pergunta cuja resposta é fundamental é o que fazer com estes números calculados de tensão, e como estão relacionados com a adequacidade, ou não, do projeto. Eles asseguram uma operação sem riscos e satisfatória do componente? É para cada um daqueles modos de falha que o projetista compara e interpreta seus valores de tensão.

Exemplificando, o problema de flambagem não pode ser analisado com base nas tensões atuantes apenas, mas é fundamental a geometria. A falha por deformação plástica pode ser controlada limitando as tensões, mas ao contrário do que ocorre com fadiga e corrosão sob tensão, a tensão máxima na seção não possui toda a informação necessária. Devemos considerar atentamente as consequências do escoamento e logo o tipo de carregamento e a distribuição de tensões, por ele provocada, devem ser analisados. A classificação de tensões segundo o tipo de carregamento e a influência destas sobre a capacidade de carga passa a ser fundamental, como veremos a seguir. Esta classificação de tensões segue as recomendações contidas nas normas da ASME para o projeto de vasos e reservatórios sob a pressão [1].

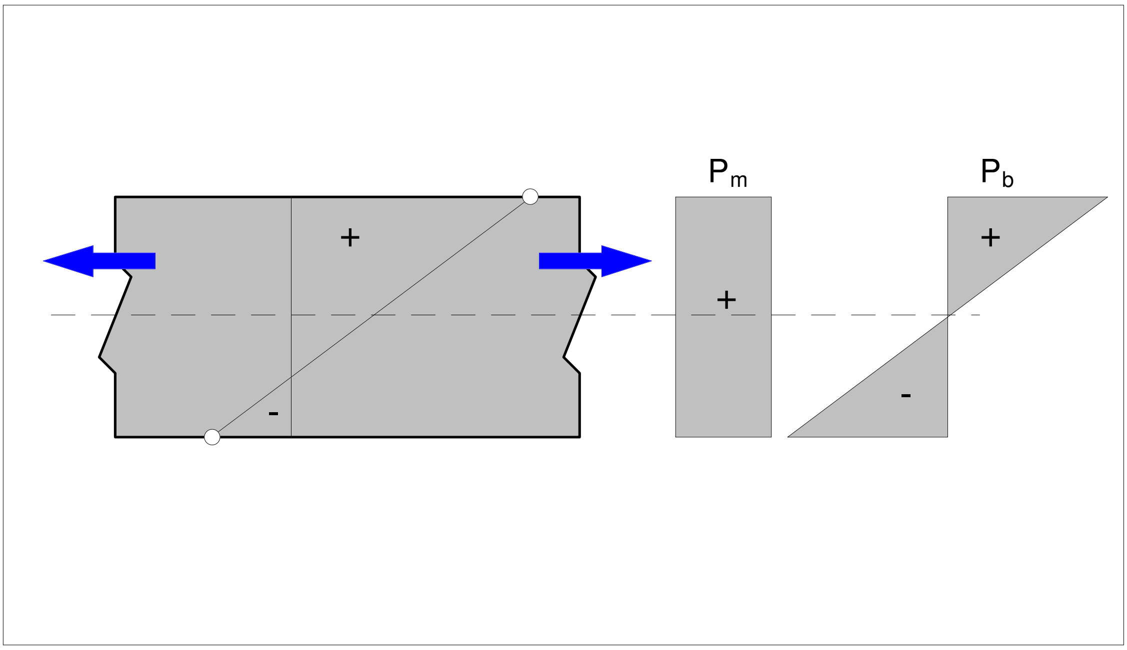

Figura 5.27 - Tensões primárias de membrana e flexão.

TENSÕES PRIMÁRIAS (P_m e P_b)

São tensões que surgem pelo carregamento imposto, necessárias para satisfazer as condições de equilíbrio entre as forças e momentos externos e os internos. A característica básica é que elas não são autolimitantes, ou seja, se uma tensão primária excede σ_E sobre toda uma seção, a capacidade de carga do componente passa a depender exclusivamente da capacidade de encruamento do material. Uma tensão primária pode ser ainda dividida em uma tensão primária de membrana (ou de tração) e uma tensão primária de flexão, como exemplificado na figura 5.27. Na figura 5.27, tanto as tensões de flexão como as de tração são tensões primárias, que equilibram a ação da força externa.

TENSÕES SECUNDÁRIAS (Q)

São as tensões desenvolvidas pela autovinculação da estrutura. Devem satisfazer a um campo de deformações imposto, e não ficar em equilíbrio com cargas externas. A característica básica de uma tensão secundária é que ela é autolimitante, ou seja, um escoamento local e pequenas distorções na peça podem satisfazer as condições de descontinuidade ou expansões térmicas que provocam o surgimento das tensões secundárias. A figura 5.28 exemplifica um caso de uma barra fixa nas duas extremidades sob a ação de tensões térmicas.

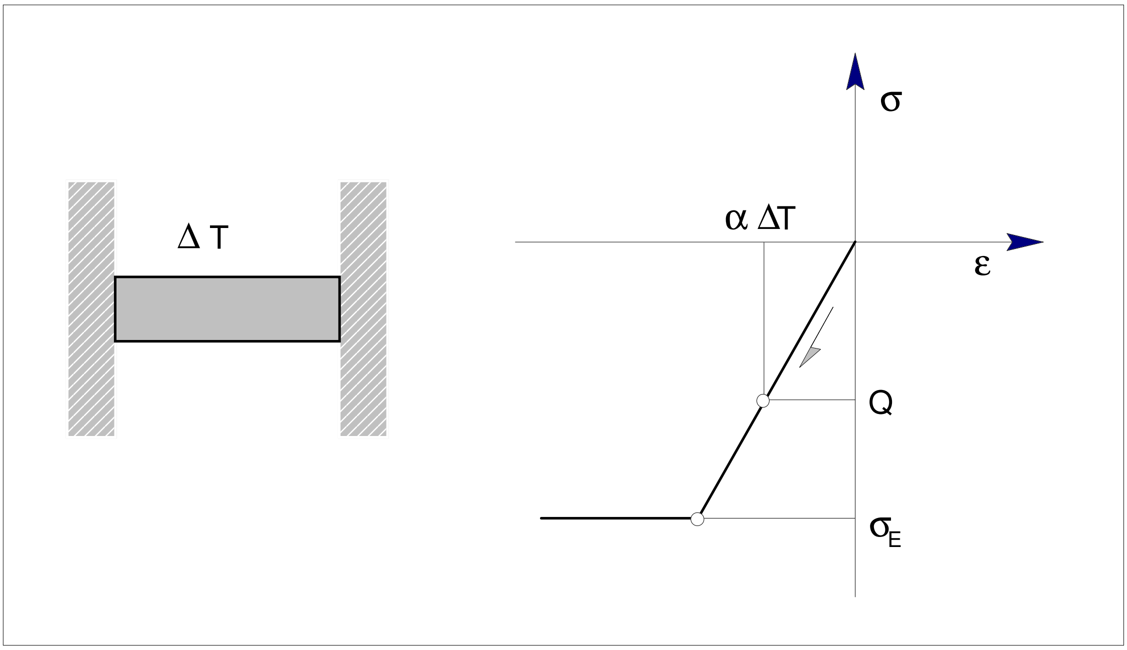

Figura 5.28 - Tensões térmicas numa barra fixa nas duas extremidades.

TENSÃO DE PICO (F)

É a tensão a ser adicionada à soma das tensões primárias de membrana e de flexão com a tensão secundária, ou seja, $P_m + P_b + Q$, de modo a fornecer a máxima tensão na seção, elasticamente calculada. A tensão de pico em materiais dúteis não é relevante para falha estática, pois caso exceda a tensão limite de escoamento não provoca distorções no componente. A tensão de pico é importante para análise de fadiga ou quando o material está sujeito a corrosão sob tensão ou ainda é muito frágil. A decomposição de uma distribuição de tensões está na figura 5.30. A tensão máxima na seção mostrada na figura 5.30 é obtida pela soma de todas as classes de tensão, ou seja,

$$\sigma_{máx} = P_m + P_b + F \qquad (5.25)$$

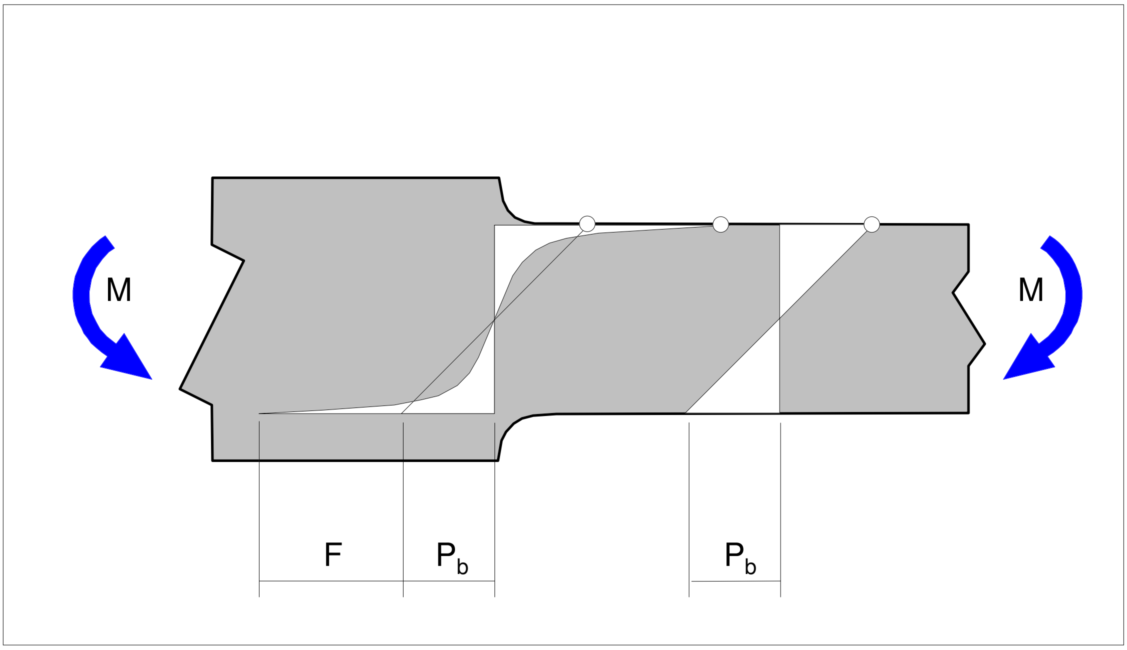

Figura 5.29 - Tensões de pico.

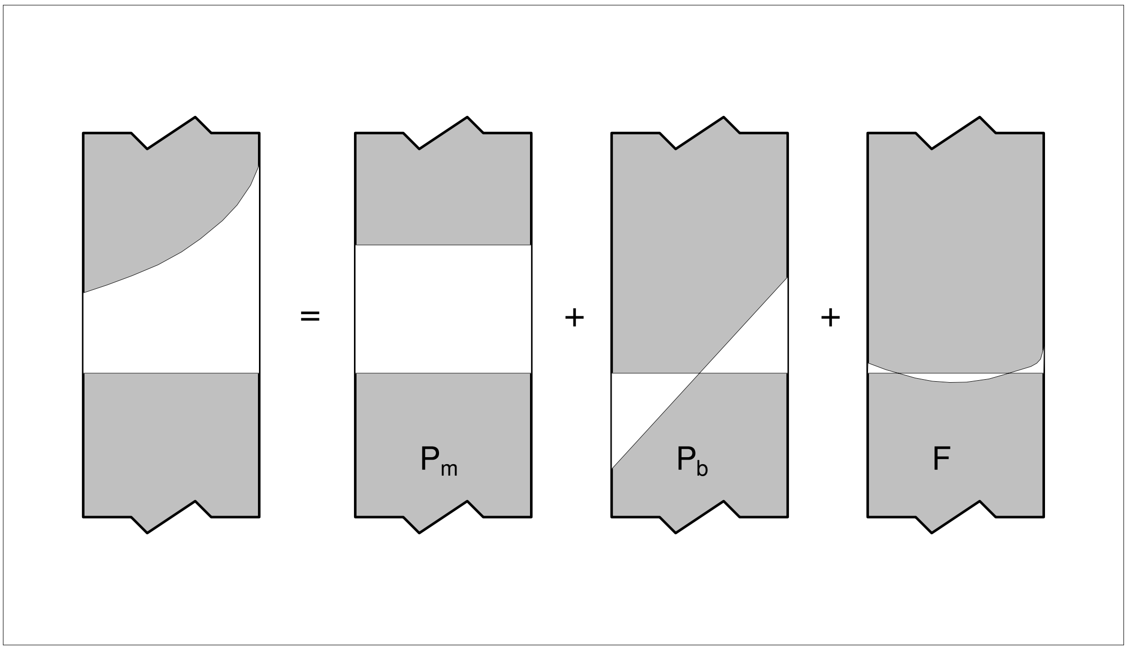

Figura 5.30 - Decomposição de tensões.

Conforme comentado, a importância da divisão é que diferentes classes possuem diferentes limites que levam à falha. Assim, quanto às tensões primárias, temos:

Tensão Primária De Membrana:

Não pode ultrapassar σ_E , para um material elastoplástico ideal, caso contrário a deformação plástica não é limitada.

Tensão Primária De Flexão:

Não pode ultrapassar k σ_E , calculada elasticamente, também para um material elastoplástico ideal, sendo k o fator de forma da seção.

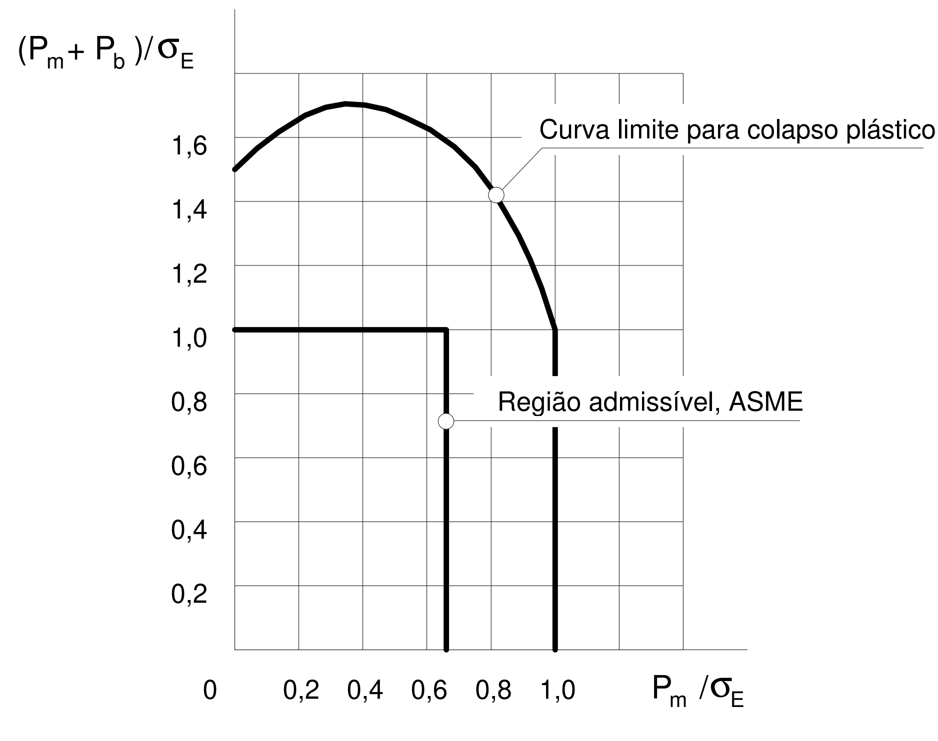

Figura 5.31 - Curvas limites para colapso plástico de uma seção retangular.

Para uma seção retangular sob flexão pura, a falha ocorre quando $P_b = 1,5\ \sigma_E$. Sob tração axial a falha ocorre para $P_m = \sigma_E$. O código ASME para reservatórios sob pressão (Seção III e Seção VIII, divisão 2) estabelece um coeficiente de segurança de 1,5, limitando assim

$$P_m < \sigma_E / 1{,}5$$

$$P_m + P_b < \sigma_E \qquad (5.26)$$

A figura 5.31 mostra a região de falha por colapso plástico para uma seção retangular, sob diferentes combinações de carga de tração e de flexão. A região interior define as tensões admissíveis adotadas pela norma da ASME, conforme comentado.