

# ARTIGOS ABRASFE

## **Teoria de Dimensionamento das Seções** *Verificações de Acordo com os Estados Limites*

Breno Santos



**ABRASFE**  
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS  
DE FÔRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

11 2276-7994  
contato@abrasfe.org.br

Av. Jabaquara, 2049 – Sala 101  
São Paulo/SP - CEP 04045-003

[www.abrasfe.org.br](http://www.abrasfe.org.br)

## Resumo

Para que a segurança e a economia das estruturas fossem asseguradas, vários métodos de dimensionamento passaram a ser utilizados nos projetos estruturais, cujos estudos tem avançado constantemente na busca de melhores resultados.

Na definição de critérios para dimensionamento de uma estrutura o fator mais importante é a segurança. Uma vez que as variáveis envolvidas no dimensionamento, como as cargas, as propriedades dos materiais, a geometria, os erros de execução, são variáveis aleatórias, não é possível garantir que uma estrutura seja segura em sua totalidade. O que é feito na prática é procurar limitar a probabilidade de colapso da estrutura a níveis que são aceitos como razoáveis. Para formentar esta necessidade, fatores de majoração de cargas e de minoração de resistência foram introduzidos, com valores baseados em dados estatísticos relativos a cada uma das variáveis aleatórias envolvidas, de modo a criar um método intermediário entre o tradicional Método das Tensões Admissíveis, e métodos mais complexos, baseados puramente em distribuições de probabilidades. Neste estudo são apresentados os conceitos básicos utilizados no desenvolvimento do Método dos Estados Limites, um método basicamente semi-probabilístico, como a maior parte dos autores o denominam.

Até meados da década de 80, as normas de projeto usualmente indicavam o dimensionamento com base em tensões admissíveis. Atualmente, boa parte da totalidade das normas em vigor baseiam-se nos estados limites, onde, para a maior parte da engenharia estrutural, o método das tensões admissíveis para dimensionamento e verificação da segurança é considerado antiquado, e não atende às necessidades de desenvolvimento do projeto com critérios mais realistas e com maior controle sobre a segurança.

## Breve Histórico

Estruturas e elementos estruturais devem ter resistência adequada, para permitir o funcionamento apropriado durante a vida útil. O projeto deve prever resistência adicional acima daquela que é necessária para suportar as cargas de serviço; isto é, a estrutura deve ser projetada tendo em vista a possibilidade de cargas acima das previstas. Essas cargas não previstas podem ser provenientes de mudanças na destinação da estrutura, efeitos de cargas subestimados devido a simplificações na análise estrutural, e de variações nos procedimentos de construção. Adicionalmente, deve haver uma previsão para a possibilidade das resistências terem sido subestimadas. Desvios nas dimensões dos elementos, embora dentro de tolerâncias aceitáveis, podem resultar em elementos com resistência inferior à resistência computada. Os materiais (aço para barras, parafusos e solda) podem ter resistência menor que a utilizada para os cálculos. Uma seção de aço pode ocasionalmente ter uma tensão de escoamento abaixo do mínimo valor especificado, mas ainda dentro dos limites estatisticamente aceitáveis. O projeto estrutural deve conduzir a segurança adequada utilizando os recursos disponíveis.

O primeiro método empregado poderia ser denominado Método Intuitivo, no qual a segurança das construções era obtida pelas concepções baseadas na intuição dos projetistas e construtores, que podia ser pura ou, mais comumente, condicionada por sucessos e insucessos de construções anteriores.

Com o desenvolvimento da mecânica estrutural, foram criadas teorias quantitativas que progressivamente reproduziam melhor os diversos comportamentos estruturais. Essas melhorias ocorreram, entre outros motivos, nas definições reológicas dos materiais, na determinação dos esforços solicitantes, nas deformações e deslocamentos provocados por determinados carregamentos ou ainda na definição de critérios de resistência dos materiais. Começam a ser utilizados então as duas teorias de dimensionamentos conhecidas atualmente, o método das tensões em serviço (conhecido também como o Método das Tensões Admissíveis - Allowable Stress Design, ASD) e o Métodos dos Estados Limites (Load and Resistance Factors Design - LRFD).



**ABRASFE**  
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS  
DE FÓRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

11 2276-7994  
contato@abrasfe.org.br

Av. Jabaquara, 2049 - Sala 101  
São Paulo/SP - CEP 04045-003

[www.abrasfe.org.br](http://www.abrasfe.org.br)

O método das Tensões Admissíveis foi a filosofia principal de projeto durante o século passado. A partir da década de 1970, o projeto estrutural vem evoluindo em direção a procedimentos mais racionais, baseados em probabilidades, e conhecido como estados limites.

O conceito de dimensionamento pelo método dos estados limites foi desenvolvido na Rússia no período de 1947 até 1949, aprovado em 1955 e introduzido na Engenharia Civil em 1958. Consistiu, portanto, na primeira tentativa de disciplinar todos os aspectos na análise de estruturas, incluindo a especificação de ações e a análise de segurança.

O método consiste em estabelecer limites acima dos quais a estrutura (ou parte dela) não respeita as condições especificadas para o uso normal, implicando no comprometimento da utilização, caracterizando os estados limites de serviço, ou acima dos quais a estrutura (ou parte dela) será considerada insegura, caracterizando os estados limites últimos.

No Brasil o método dos estados limites foi inicialmente introduzido para estruturas de concreto, através da norma NB1 na década de 70. No início da década de 80, a parte referente a ações passou a ser tratada independentemente pela norma NBR 8681 "Ações e segurança nas estruturas". Em 1986 foi publicada a primeira versão da NBR 8800 "Projeto e execução de estruturas de aço para edifícios", baseada na filosofia dos estados limites.

O dimensionamento através do método dos estados limites se subdivide em duas análises: os estados limites últimos, os quais estão associados a segurança propriamente dita, isto é, a ocorrência de falha (colapso) estrutural; e estados limites de serviço associados ao desempenho da estrutura sob condições normais de uso da construção.

### **Método das Tensões Admissíveis**

O método de cálculo estrutural tradicional que dominou a maior parte do século vinte foi o método de cálculo em Tensões Admissíveis, também conhecido na literatura americana como WSD (Working Stress Design) ou ASD (Allowable Stress Design).

Este é um método determinístico, ou seja, para um mesmo elemento estrutural, com as mesmas vinculações, a partir da aplicação de uma solicitação de acordo com determinada lei de variação ao longo do tempo, se pudesse ser repetida diversas vezes, produziria em todas elas os mesmos esforços internos, as mesmas deformações e os mesmos deslocamentos.

A equação básica para o Método das Tensões admissíveis é:

$$\sigma_{\max} \leq R_k / \gamma$$

$R_k$  = Resistência nominal (característica) do material

$\gamma$  = Coeficiente que considera as incertezas quanto ao carregamento, resistência do material, modelo de cálculo utilizado e imperfeições na execução.

O cálculo em tensões admissíveis é um método de cálculo muito atrativo, fácil de usar do ponto de vista computacional e de fácil compreensão. Basta simplesmente verificar se a estrutura é segura sob ações, usando uma tensão admissível substancialmente abaixo de um valor limitante. Nessa filosofia todas as cargas são consideradas com a mesma variabilidade. Toda a variabilidade de cargas e resistências é colocada no lado direito da desigualdade, isto é, do lado da resistência do material.

Apesar dos atrativos citados acima, o método também apresenta suas desvantagens. Inicialmente, o método de cálculo em tensões admissíveis dá pouca informação sobre a capacidade real da estrutura. Para diferentes tipos de estruturas, a relação da ação limite baseada em tensões admissíveis para a resistência última é até certo ponto variável. Isto é especialmente verdade para estruturas indeterminadas



**ABRASFE**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS  
DE FÓRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

11 2276-7994

contato@abrasfe.org.br

Av. Jabaquara, 2049 - Sala 101  
São Paulo/SP - CEP 04045-003

[www.abrasfe.org.br](http://www.abrasfe.org.br)

estaticamente. Para muitas estruturas, a suposição da linearidade entre tensões e deformações, esforços e ações, não é muito realista até mesmo sob níveis de ações de trabalho. O método também não considera as condições em serviço, que podem invalidar a estrutura, como por exemplo uma deformação excessiva.

No começo deste século, ficou também evidente para muitos engenheiros, que o método de tensões admissíveis não foi uma ferramenta de cálculo muito econômica. Isto levou ao desenvolvimento de métodos de cálculo plástico para estruturas de aço. Outros pesquisadores começaram a perceber a possibilidade de quantificar os juízos e incertezas que são a base dos fatores de segurança, usando a teoria de probabilidade.

A partir das necessidades estruturais crescentes, tais como, teoria de probabilidade, de plasticidades, e pesquisa extensa do comportamento de resistência última de vários tipos de estruturas e conexões, surgiu a primeira geração de normas de cálculo baseadas na capacidade última e, eventualmente, conhecidas como normas de cálculo em estados limites.

### **Método dos Estados Limites**

O método dos estados limites proporciona um dimensionamento mais detalhado e claro da estrutura, além de propiciar o lançamento de uma estrutura mais econômica que o método das tensões admissíveis. Este método considera as incertezas de forma mais racional do que o das tensões admissíveis.

Trata-se de um método basicamente semi probabilístico, ou seja, é fundamentado em análise estatística com coeficientes de ponderação aplicados tanto as ações quanto às resistências dos materiais, porém admitindo o comportamento estrutural como determinístico. Por este fato é chamado de semi probabilístico.

Em bora não muito difundido, a aplicação do método dos estados limites pode surgir em três níveis diferentes:

Nível 1 é o nível mais simplista e o utilizado atualmente. É um método semi-probabilístico. Tanto as ações quanto a resistência dos materiais são introduzidos com o valor característico afetado por um fator de segurança parcial.

Nível 2. A sua utilização é limitada a casos muito limitados. É um método probabilístico. Ações e resistência dos materiais são definidos com determinados parâmetros estatísticos associados com um nível de confiabilidade. Este nível é a base para o cálculo dos coeficientes parciais de segurança utilizados no nível 1.

Nível 3. Praticamente não utilizados. É um método probabilístico. Ações e resistência dos materiais são representados por funções de distribuição. Os níveis de segurança são dados em termos de probabilidade de ruína previamente fixada.

Um estado limite ocorre sempre que a estrutura deixa de satisfazer um dos seus objetivos, que podem ser divididos em estados limites últimos e estados limites de serviço (utilização).

A equação básica do método, que garante a segurança da estrutura, é mostrada abaixo.

$$S_d \leq R_d$$

$S_d$  = Esforço solicitante de projeto ou de cálculo

$R_d$  = Resistência de Projeto do Material

Sendo

$$S_d = S (\sum \gamma_F F_k)$$



$$R_d = \phi R_k / \gamma_M$$

$\gamma_F$  = Coeficiente de majoração das cargas

$F_k$  = Ação Característica

$R_k$  = Resistência nominal (característica) do material

$\gamma_M$  = Coeficiente de minoração da resistência do material

O método se baseia na decomposição dos coeficientes de segurança em dois fatores:

1. Fator de Amplificação das Solicitações ( $\gamma_F$ )
2. Fator de Redução da Resistência Interna do Material ( $\phi$ )

Os coeficientes refletem as variabilidades dos valores característicos dos diversos carregamentos e das características mecânicas dos materiais. Para cada tipo de carregamento existe um coeficiente apropriado. Os valores dos coeficientes irão depender da norma de dimensionamento adotada.

Pela natureza das estruturas dos sistemas de fôrmas, devem ser considerados os respectivos cálculos dos estados limites para as situações típicas de um projeto transitório, a saber:

- (a) Durante a montagem,
- (b) Escoramento Montado e anteriormente a concretagem,
- (c) Durante a concretagem,
- (d) Após a concretagem e
- (e) Durante a desfôrma.

### **Estados Limites Últimos**

Os estados limites últimos estão associados à ocorrência de cargas excessivas e conseqüente colapso da estrutura devido, por exemplo, a perda de equilíbrio como corpo rígido, ruptura de uma seção ou instabilidade em regime elástico ou não.

Estão relacionados com o esgotamento da capacidade portante da estrutura, ou seja, determinam a paralisação no todo ou em parte, da utilização do sistema. Em geral é originado por um ou mais dos seguintes fatores:

a.- Perda de equilíbrio de uma parte ou do conjunto da estrutura, assimilada esta a um corpo rígido; por exemplo, tombamento, arrancamento de suas fundações, deslizamentos etc.;

b.- Ruína (colapso) da estrutura, ou seja, transformação da estrutura original em uma estrutura parcial ou totalmente hipoestática, por plasticidade;

c.- Perda da estabilidade de uma parte ou do conjunto da estrutura, por deformação;

d.- Deformação elástica ou plástica, deformação lenta e fissuração (no caso de concreto estrutural) que provoquem uma mudança de geometria que exija uma substituição da estrutura;

e.- Perda de capacidade de sustentação por parte de seus elementos, ruptura de seções, por ter sido ultrapassada a resistência do material, sua resistência à flambagem, resistência à fadiga etc.;

f.- Propagação de um colapso que se inicia em um ponto ou região da estrutura, para uma situação de colapso total – colapso progressivo ou falta de integridade estrutural;



**ABRASFE**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS  
DE FÔRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

11 2276-7994

contato@abrasfe.org.br

Av. Jabaquara, 2049 – Sala 101  
São Paulo/SP - CEP 04045-003

[www.abrasfe.org.br](http://www.abrasfe.org.br)

- g.- Grandes deformações, instabilidade global;*
- h.- Sensibilidade da estrutura aos efeitos da repetição das ações, do fogo, de uma explosão e outros.*

*A perda de equilíbrio das estruturas do escoramento pode ser produzida pela ação do vento sobre as superfícies verticais deste escoramento. Para escoramentos apoiados no solo, os elementos estruturais utilizados devem ser suficientes para o equilíbrio do escoramento a partir de fixações e prumo destes elementos. No caso de fôrmas Trepantes, a resistência dos elementos de apoio do trepante e a fixação do mesmo para resistir a ação do vento também devem ser analisados.*

*A falha por esgotamento da capacidade resistente da estrutura, das seções dos elementos estruturais ou dos elementos de união pode ser produzida pelos esforços a que os elementos constitutivos do escoramento são submetidos durante a montagem, após a montagem, durante a concretagem e após a concretagem, devendo a resistência de cada um dos elementos que formam o sistema do escoramento ser analisada. No caso de sistemas trepantes, a resistência dos consoles e a fixação do mesmo também deve ser avaliado.*

### **Estados Limites de Utilização**

*O estados limites de serviço são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e a boa utilização funcional da mesma, seja em relação aos usuários, às máquinas ou aos equipamentos utilizados.*

*Os estados limites de serviço correspondem às exigências funcionais e de durabilidade da estrutura, podendo ser originados por um ou vários dos seguintes fenômenos:*

- a.- Deformações excessivas para uma utilização normal da estrutura, como por exemplo: flechas ou rotações que afetam a aparência da estrutura, o uso funcional, ou que possam causar danos a componentes não estruturais e aos seus elementos de ligação;*
- b.- Deslocamentos excessivos sem perda do equilíbrio;*
- c.- Danos locais excessivos (fissuração, rachaduras, corrosão, escoamento localizado ou deslizamento) que afetam a aparência, a utilização ou a durabilidade da estrutura;*
- d.- Vibração excessiva que afeta o conforto ou a operação de equipamentos.*

*Os estados limites de utilização incluem basicamente a verificação das deformações e vibrações excessivas, além de outros fatores como a fadiga e a abertura de fissuras em caso de estruturas de concreto armado.*

*O dimensionamento é realizado com o valor das cargas em serviço, a fim de verificar o funcionamento da estrutura para as cargas que estão realmente atuando, sem majoração.*

*É importante verificar se não haverá deslocamento nem vibração excessiva, pois estes fenômenos acarretam sensações de insegurança aos usuários da estrutura, podem danificar equipamentos, formar fissuras, entre outros fatores indesejáveis na vida útil da estrutura.*



**ABRASFE**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS  
DE FÔRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

11 2276-7994  
contato@abrasfe.org.br

Av. Jabaquara, 2049 - Sala 101  
São Paulo/SP - CEP 04045-003

[www.abrasfe.org.br](http://www.abrasfe.org.br)

## **Referências**

*Comparação entre o dimensionamento de uma estrutura OffShore pelo método das tensões admissíveis e pelo Método dos Estados Limites – Paula Baliú Carnevale*

*Concreto Armado: estados limites de serviço – ELS – Valdirene Maria Silva, Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs, José Samuel Giongo*

*Segurança nas Estruturas – José Jairo de Sales, Jorge Munaiar Neto, Maximiliano Malite*

*Hormigón Pretensado – Alfonso Cobo Escamilla, Luis Felipe Rodríguez Martín*



**ABRASFE**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS  
DE FÔRMAS, ESCORAMENTOS E ACESSO

11 2276-7994  
contato@abrasfe.org.br

Av. Jabaquara, 2049 – Sala 101  
São Paulo/SP - CEP 04045-003

[www.abrasfe.org.br](http://www.abrasfe.org.br)