



Estruturas de Concreto Protendido

- Ângelo Vieira Mendonça, Prof. Dr.

Segurança



Introdução

A preocupação com a segurança das construções não é recente.

Código de Hamurabi, Rei da Babilônia, 1750 A.C., dizia:

“ Se a construção cair e matar o filho do proprietário, o filho do construtor será morto”

▪ **Principais fatores de incerteza no cálculo estrutural**

- ✓ Variabilidade dos pesos próprios e demais carregamentos;
- ✓ Variabilidade das resistências dos materiais;
- ✓ Diferença de comportamento do material no ensaio e na estrutura;
- ✓ Falhas na execução de ensaios laboratoriais;
- ✓ Precisão das hipóteses de cálculo;
- ✓ Defeitos de execução das peças

Segurança



Introdução

Se a incerteza é um fator presente no cálculo estrutural, então por que fazê-lo?

“ O objetivo do projeto estrutural é que se tenha uma *probabilidade aceitável* (isto é, PEQUENA) de que a estrutura projetada se torne imprópria a sua destinação, durante sua vida útil prevista”

■ **Exigências na concepção e cálculo de estruturas**

- ✓ Resistir com certo grau de segurança a todas cargas e deformações possíveis que possam ocorrer durante a construção e utilização da construção;
- ✓ Comportar-se satisfatoriamente ao longo da vida útil sob operação prevista;
- ✓ Apresentar durabilidade conveniente durante sua existência.



Introdução

Projeto estrutural:
(Resistência-comportamento adequado-durabilidade)

- **Requisitos para elaboração de procedimentos de cálculo de estruturas**
 - ✓ Teorias científicas;
 - ✓ Dados experimentais;
 - ✓ Observação de casos na história da construção.

Verificação da Segurança

A NBR 6118:2003 especifica: “na verificação da segurança das estruturas de concreto devem ser atendidas as condições construtivas e as condições analíticas de segurança”

■ **Condições construtivas** (item 12.5.1, NBR 6118:2003)

- ✓ Critérios de detalhamento (Capítulos 18 e 20, NBR 6118:2003);
- ✓ Controle de materiais (especialmente a NBR 12655) ;
- ✓ Controle de execução da obra (especialmente NBR 14931:2004).

■ **Condições analíticas**

(item 12.5.2, NBR 6118:2003)



$$R_d \geq S_d$$

“As **resistências não devem ser menores que as solicitações** e devem ser verificadas em relação a **todos os estados limites e todos os carregamentos** especificados para o tipo de construção considerada”

Segurança

Estados Limites

Diz-se que uma estrutura, ou parte dela, atinge um estado limite quando deixa de satisfazer às condições para as quais foi projetada.

- Podem ser classificados em Estados Limites Últimos(ELU) e Estados Limites de Serviço(ELS):

Carregamento

Um carregamento é definido pela combinação das ações que têm probabilidades não desprezíveis de atuarem simultaneamente sobre a estrutura, durante um período pré estabelecido.

- Podem ser classificados em combinações últimas e combinações de Serviço.

Segurança

Avaliação das solicitações e resistências

Em princípio, as técnicas para avaliação das resistências e solicitações nas estruturas podem ser classificadas em três grupos: Método determinístico, Método probabilístico e Método semi-probabilístico

▪ **Método Determinístico**

- ✓ Não leva em conta a variabilidade das ações e das propriedades mecânicas do material.
- ✓ Foi utilizado na filosofia das Tensões admissíveis.

▪ **Método Probabilístico**

- ✓ Leva em conta a variabilidade das ações e das propriedades mecânicas do material.
- ✓ Exige uma matemática extremamente complexa, em muitos casos inexecutável.

Segurança



Avaliação das solicitações e resistências

■ **Método Semi-Probabilístico**

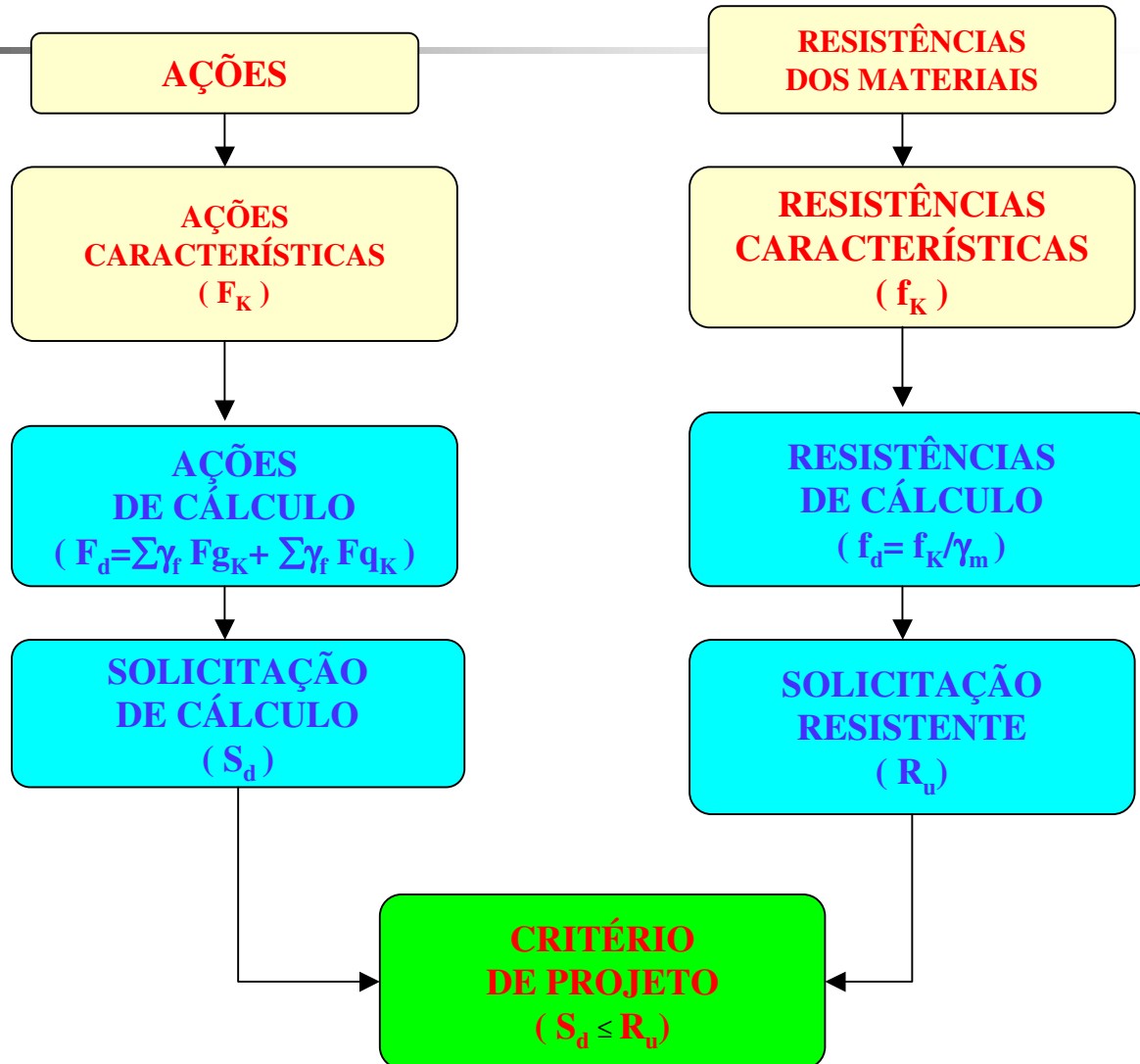
- ✓ Faz-se um estudo estatístico de amostragens de valores de ações e das propriedades dos materiais que podem ocorrer em certa construção, daí, obtém-se seus respectivos valores característicos;
- ✓ Os valores de cálculos são obtidos pelas combinações dos valores característicos e de coeficientes de ponderação determinístico, isto é, obtidos sem análise estatística prévia.
- ✓ Esta técnica é adotada pelas principais normas brasileiras, inclusive pela NBR 6118:2003.

SegurançaAvaliação das solicitações e resistências

■ Método Semi-Probabilístico

análise estatística

análise determinística



Segurança

Estados Limites Últimos

São aqueles que dizem respeito à máxima capacidade portante da estrutura. Sua simples ocorrência determina a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção.

■ **Ocorrência**

- ✓ Ruptura ou deformações excessivas de seções críticas;
- ✓ Instabilidade mecânica (flambagem);
- ✓ Perda de equilíbrio total ou parcial da estrutura considerada como corpo rígido;
- ✓ Transformação da estrutura em um mecanismo;
- ✓ Fadiga (diminuição da resistência devido a cargas cíclicas);

■ **Carregamentos correspondentes**

- ✓ Combinações últimas

Segurança



Estados Limites de Serviço

“ são aqueles relacionados à durabilidade das estruturas, aparência, conforto do usuário e a boa utilização funcional da mesma, sejam em relação aos usuários, seja às máquinas e aos equipamentos utilizados.”

Segurança



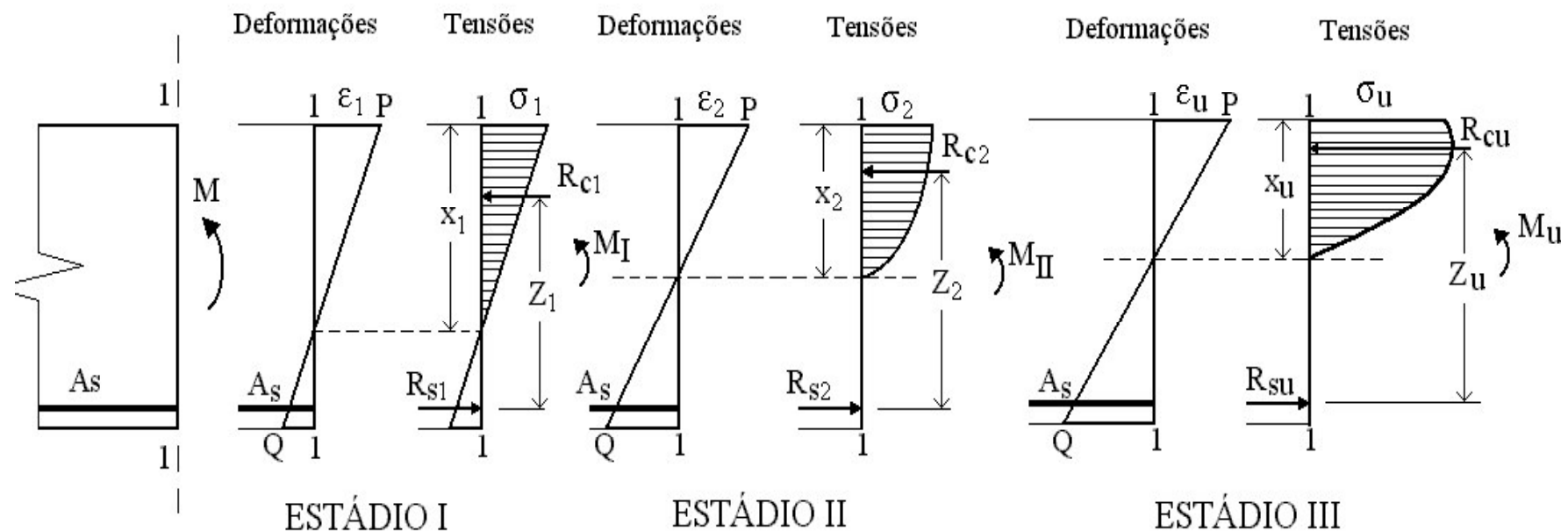
Estados Limites de Serviço

Classificação

- Estado limite de formação de fissuras;
- Estado limite de abertura das fissuras;
- Estado limite de deformações excessivas;
- Estado limite de descompressão;
- Estado limite de descompressão parcial;
- Estado limite de vibrações excessivas.

Segurança-ELSVerificação no ELS: estágio de comportamento

Para a verificação dos ELS é necessário identificar o estágio de comportamento da peça



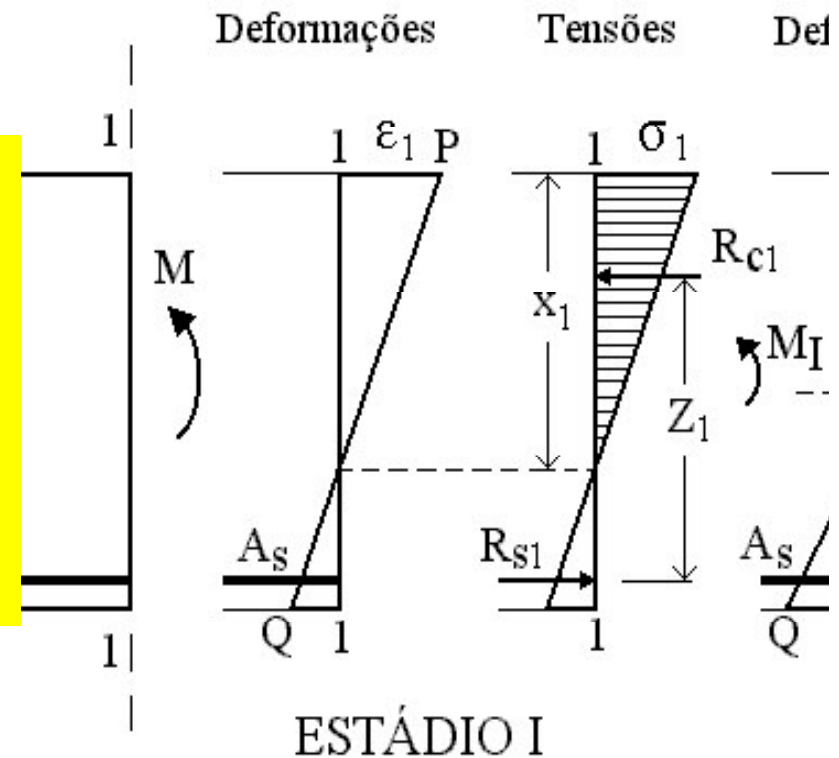
Segurança-ELSVerificação no ELS: estágio I

- Estado elástico: sob a ação de um momento fletor de pequena intensidade, a tensão de tração no concreto não ultrapassa o valor característico à tração (f_{tk}).

As tensões nas fibras comprimidas são proporcionais às deformações;

O diagrama de tensão normal ao longo da seção é linear;

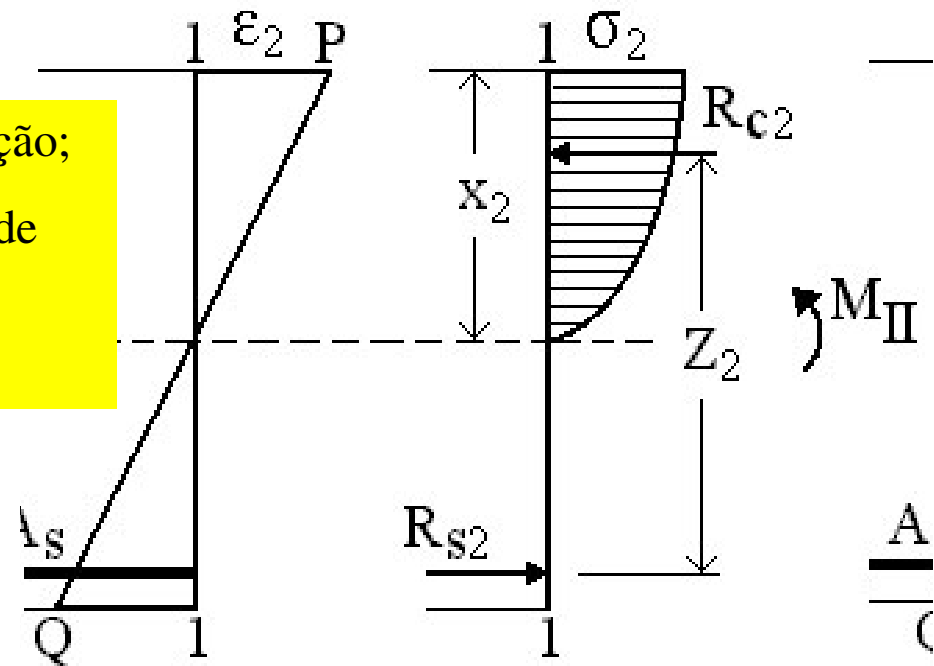
Não há fissuras visíveis.



Segurança-ELSVerificação no ELS: estágio II

- Estado de fissuração: aumentando-se M , as tensões de tração na maioria dos pontos abaixo da LN terão valores superiores ao da resistência de tração (f_{tk}).

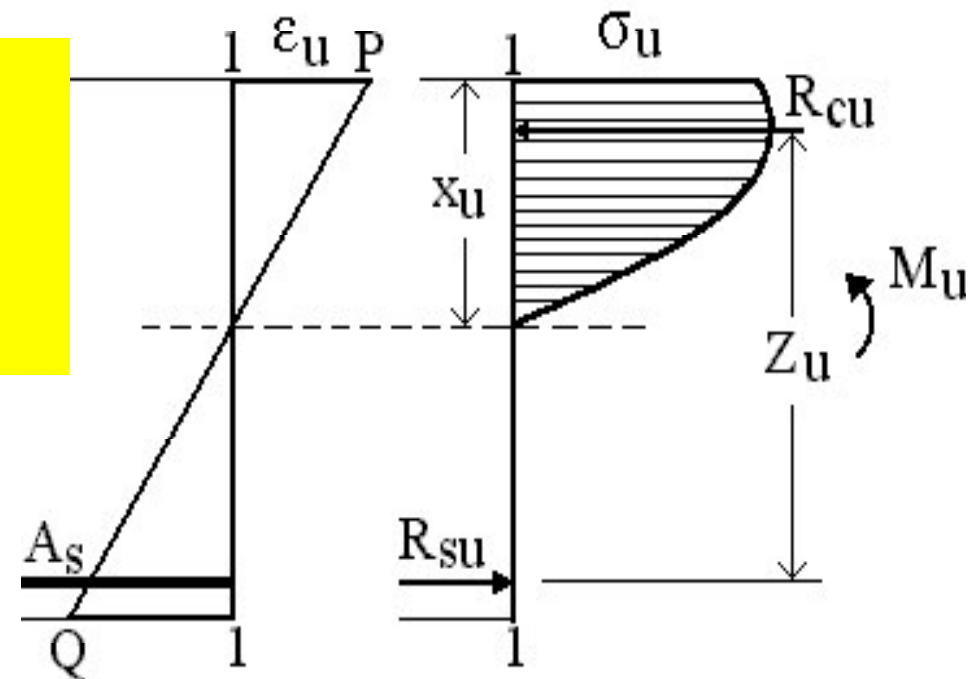
- Apenas o aço resiste aos esforços de tração;
- A tensão de compressão no concreto pode ser considerada linear;
- As fissuras de tração são visíveis.



Segurança-ELSVerificação no ELS: estágio III

Estado de ruína: aumenta-se M até um valor próximo da ruína.

- A fibra mais comprimida do concreto começa a escoar, atingido a $\epsilon_c = 0,35\%$;
- O diagrama de tensões tende a ficar vertical, com quase todas as fibras com deformações maiores que $0,2\%$;
- Supõe-se que a distribuição de tensões no concreto ocorra segundo um diagrama parábola-retângulo
- A peça está bastante fissurada, com as fissuras atingido a zona comprimida, diminuindo-a;



Segurança-ELS

Estado Limite de formação de fissuras

Estado em que se inicia a formação de fissuras

$$f_{ctk} = 10\% f_{ck} \Rightarrow \text{fissuração inevitável}$$

- Utilizar combinação rara de serviço!

- **Cálculo do momento de fissuração**

$$M_r = \frac{f_{ctm} \cdot I_g}{h - x}$$

f_{ctm} – resistência média do concreto à tração na flexão

I_g , - momento de inércia da seção homogeneizada

x – posição da linha neutra da peça não-fissurada (estádio I)

h – altura da seção



Estado Limite de formação de fissuras

- Identificação do comportamento da peça (estádios I ou II);
- Cálculo da armadura mínima, para evitar ruptura frágil;
- Para o concreto protendido: graus de protensão:
 - ⌘ **Protensão Completa** - Não se admite tensões de tração;
 - ⌘ **Protensão Limitada** - Admitem-se tensões de tração sem ultrapassar o estado limite de formação de fissuras;

Segurança-ELSEstado Limite de abertura de fissuras

“Estado em que a peça encontra-se com aberturas iguais aos máximos especificados para a construção”

- Peça encontra-se no estágio II
- Utiliza-se a combinação freqüente de serviço

✓ **Estimativa dos valores de abertura de fissuras:**

$$\omega = \text{menor entre} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\phi_i}{2 \cdot \eta_i - 0,75} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \frac{3 \cdot \sigma_{si}}{f_{ct,m}} \\ \frac{\phi_i}{(2 \cdot \eta_i - 0,75)} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \end{array} \right.$$

A_{cri} = área da região de envolvimento protegida pela barra ϕ_i .

E_{si} = módulo de elasticidade do aço

ϕ_i = diâmetro da barra

ρ_{ri} = taxa de armadura passiva ou ativa aderente em relação a área da região de envolvimento

σ_{si} = é a tensão de tração no centro de gravidade da armadura considerada, calculada no Estádio II.

Segurança-ELSEstado Limite de abertura de fissuras

(valores Limites NBR 6118:2003)

■ Região sem armadura ativa

- 0,3mm - máxima abertura de fissura para as classes de agressividade II e IV.
- 0,4mm - máxima abertura de fissuras para classe de agressividade I .

■ Região com armadura ativa

Classe de exposição	Pós-tração	Pré- tração
1	0,20mm	0,20mm
2	0,20mm	Protensão limitada
3 e 4	Protensão limitada (1)	Completa

Segurança-ELS

Estado Limite de abertura de fissuras

(Classes de agressividade NBR 6118:2003)

Classe de agressividade ambiental (CAA)	Agressividade	Risco de deterioração da estrutura
I	fraca	insignificante
II	moderada	pequeno
III	forte	grande
IV	muito forte	elevado

Segurança-ELSEstado Limite de abertura de fissuras

(Classes de agressividade versus condições de exposição)

Macro-clima	Micro-clima			
	Ambientes internos		Ambientes externos e obras em geral	
	Seco ¹⁾ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ²⁾ de molhagem e secagem	Seco ³⁾ UR ≤ 65%	Úmido ou ciclos ⁴⁾ de molhagem e secagem
Rural	I	I	I	II
Urbana	I	II	I	II
Marinha	II	III	----	III
Industrial	II	III	II	III
Especial ⁵⁾	II	III ou IV	III	III ou IV
Respingos de maré	----	----	----	IV
Submersa ≥ 3m	----	----	----	I
Solo	----	----	não agressivo I	úmido e agressivo II, III ou IV



Estado Limite de descompressão

- ✓ Situação típica para o concreto protendido;
- ✓ Caracteriza-se pela anulação do esforço de compressão no concreto provocado pela protensão;
- ✓ É o estado no qual em um ou mais pontos da seção transversal a tensão normal é nula, não havendo tração no restante da seção;
- ✓ Verificação relacionada ao Estado Limite de Formação de Fissuras, pois determina o grau de protensão;
- ✓ Utiliza-se a Combinação Rara de Serviço.

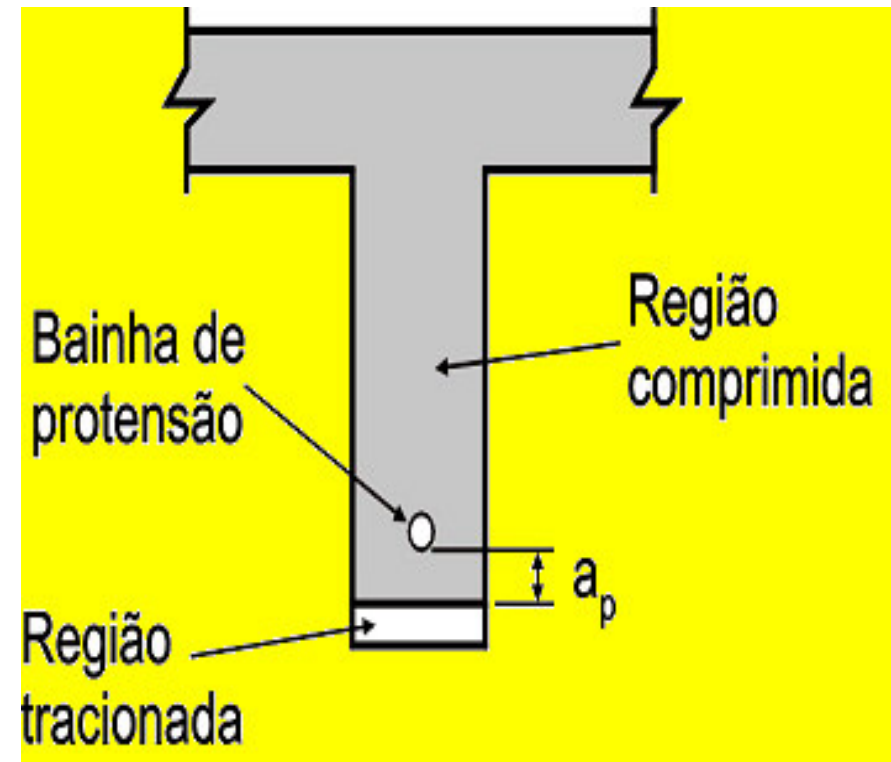
Segurança-ELS

Estado Limite de descompressão parcial

✓ Estado no qual garante-se a compressão na seção transversal, na região onde existem armaduras ativas, que deve se estender a uma distância maior que a_p da face mais próxima da cordoalha ou da bainha de protensão;

✓ Verificação relacionada ao ELS(Formação de Fissuras), pois determina o grau de protensão;

✓ Utiliza-se a Combinação Rara de Serviço.



Estado Limite de Vibrações Excessivas

Estado em que as vibrações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da estrutura;

✓ Modificações introduzidas pela repetição de solicitações podem afetar significativamente as estruturas em serviço

(aparecimento de fissuras não existentes sob ações estáticas)

✓ Sensação desagradável provocada por vibrações aos usuários

✓ A análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais;

✓ Deve-se afastar o máximo possível a frequência natural da estrutura (f) da frequência crítica (f_{crit}).

$$f > 1,2 f_{crit}$$

Segurança-ELSEstado Limite de Vibrações Excessivas

✓ Na falta de valores experimentais, adota-se os seguintes valores f_{crit} .

Caso	f_{crit}
Ginásio de esportes	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Escritórios	3,0 a 4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,4
Passarelas de pedestres ou ciclistas	1,6 a 4,5

✓ Tabela válida para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas

Segurança-ELS

Estado Limite de Deformações Excessivas

- Estado em que as deformações atingem os limites estabelecidos para a utilização normal da construção

Situações em que a verificação de deformações é importante:

- ✓ Flechas que resultem em aspecto visual desagradável (problemas de vento e temperatura) - combinação freqüente
- ✓ Limitação de deformação p/ evitar a fissuração de elementos de vedação - combinação freqüente
- ✓ Flechas devido à fluência - combinação freqüente
- ✓ Limitação de deformação p/ evitar vibrações excessivas

Segurança-ELS**Estado Limite de Deformações Excessivas**

Valores Limites (NBR 6118:2003)

- **Aceitabilidade sensorial**

Deslocamentos máximos que não causem sensações desagradáveis aos usuários da estrutura.

Tipo de deslocamento	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Aceitabilidade sensorial	Visual	Deslocam. visíveis em elementos estruturais	Total	$l/250$
	Outro	Vibrações sentidas no piso	Devidos a cargas acidentais	$l/350$

Segurança-ELSEstado Limite de Deformações Excessivas

Valores Limites (NBR 6118:2003)

■ **Estrutura em serviço**

Deslocamentos que podem prejudicar a utilização adequada da estrutura

Tipo de deslocamento	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Estrutura em serviço	Superfícies que devem drenar água	Coberturas e varandas	Total	1/250 ¹⁾
	Pavimentos que devem permanecer planos	Ginásios e pistas de boliche	Total	1/350 + contra-flecha ²⁾
			Ocorrido após a construção do piso	1/600
	Elementos que suportam equipamentos sensíveis	Laboratórios	Ocorrido após nivelamento equipamento	De acordo com fabricante do equipamento



Estado Limite de Deformações Excessivas

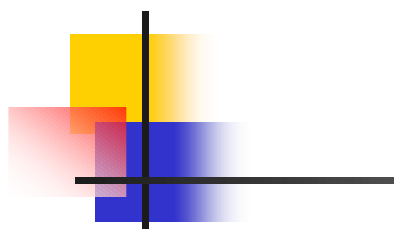
Valores Limites (NBR 6118:2003)

- **Efeitos em elementos não-estruturais**

Deslocamentos que não prejudiquem o funcionamento dos elementos não-estruturais.

Estado Limite de Deformações Excessivas

Estruturas de Concreto Protendido



**Valores Limites
(NBR 6118:2003)**

Tipo de deslocamento	Razão da limitação	Exemplo	Deslocamento a considerar	Deslocamento limite
Efeitos em elementos não estruturais	Paredes	Alvenaria, caixilhos e revestimentos	Após a construção da parede	$l/500^{(3)}$ ou 10 mm ou $\theta=0,0017 \text{ rad}^{(4)}$
		Divisórias leves e caixilhos telescópicos	Ocorrido após a instalação da divisória	$l/250^{(3)}$ ou 25 mm
		Movimento lateral de edifícios	ação do vento p/ combinação freqüente ($\psi_1=0,20$)	$H/2500$ ou $H_i/1250^{(5)}$ entre pavimentos⁽⁶⁾
		Movimentos térmicos verticais	Provocado por diferença de temperatura	$l/400^{(7)}$ ou 15 mm
	Forros	Movimentos térmicos horizontais	Provocado por diferença de temperatura	$H_i/500$
		Revestimentos colados	Ocorrido após construção do forro	$l/350$
		Revestimentos pendurados ou com juntas	Deslocamento ocorrido após construção do forro	$l/175$
	Ponte rolante	Desalinhamento de trilhos	Desloc. devido ações da frenação	$H/400$

Segurança-ELS

Combinações das solicitações de serviço

Classificação (NBR 6118:2003)

■ **Quase-permanentes**

Combinações que podem atuar durante grande parte do período de vida da estrutura

(utilizadas na verificação do estado limite de deformações excessivas).

■ **Freqüentes**

Combinações que se repetem muitas vezes durante o período de vida da estrutura

(utilizadas na verificação dos estados limites de formação de fissuras, de abertura de fissuras e de vibrações excessivas)

■ **Raras**

Combinações que ocorrem algumas vezes durante o período de vida da estrutura (Utilizadas na verificação do Estado Limite de Formação de Fissuras)

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço**Coeficiente de ponderação das ações**

As ações devem ser majoradas pelo coeficiente γ_f

Simultaneidade
das ações

Desvios não-previstos
entre a construção e os
valores de projeto para as
ações

$$\gamma_f = \gamma_{f1} * \gamma_{f2} * \gamma_{f3}$$

Coeficiente de
ponderação

Variabilidade das
ações

$$\text{ELS} \left\{ \begin{array}{l} \gamma_{f1} * \gamma_{f3} = 1 \\ \gamma_{f2} = \begin{cases} \psi_2 & \text{Valor quase-permanente} \\ \psi_1 & \text{Valor freqüente} \end{cases} \end{array} \right.$$

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Combinações de serviço	Descrição	Cálculo das solicitações
Comb. quase-permanente de serviço	Todas as ações variáveis são consideradas com seus valores quase-permanentes $\Psi_2 F_{qk}$	$F_{d, ser} = F_{gk} + \Psi_{2j} F_{qj,k}$
Comb. freqüentes de serviço	A ação variável principal F_{q1} é tomada com seu valor freqüente $\Psi_1 F_{q1k}$; as demais ações variáveis são ponderadas com $\Psi_2 F_{qk}$	$F_{d, ser} = F_{gk} + \Psi_1 F_{q1k} + \Psi_{2j} F_{qjk}$
Comb. raras de serviço	A ação variável principal F_{q1} é tomada valor característico F_{q1k} ; as demais ações são ponderadas com valores freqüentes $\Psi_1 F_{qk}$	$F_{d, ser} = F_{gk} + F_{q1k} + \Psi_{1j} F_{qjk}$

$F_{d, ser}$ é o valor de cálculo das ações para combinações de serviço

F_{qk} é o valor característico das ações variáveis principais diretas

ψ_1 é o fator de redução de combinação freqüente para ELS

ψ_2 é o fator de redução de combinação quase-permanente para ELS

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Valores de redução das combinações (NBR 6118:2003)

 γ_{f2}

Ações		γ_{f2}	
		γ_{f1}^{D}	γ_{f2}
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ³⁾	0,6	0,4
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,5	0,3



Combinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Seja uma viga de concreto armado em balanço de seção transversal 20x60 cm e vão de 4m. As ações permanentes são (peso próprio da estrutura), (peso próprio dos acessórios fixados à viga com valor de 1kN/m); já as ações acidentais são compostas por (carga usual de utilização com valor de 1,5 kN/m), (sobrecarga devido à acumulação de resíduos sólidos 1,0 kN/m) e (vento de sucção com valor de 0,4 kN/m).

Pede-se:

Os valores extremos do momento de cálculo no engaste para os carregamentos quase-permanente, freqüente e raro.

Segurança-ELS

Combinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Ações

- Permanentes

Peso Próprio: $g_1 = A \gamma_c = 0,2 * 0,6 * 25 = 3kN / m$

Acessórios: $g_2 = 1kN / m$

Solicitações: Momentos representativos no engaste

$$Mg_1 = -3 * 4^2 / 2 = -24kNm$$

$$Mg_2 = -1 * 4^2 / 2 = -8kNm$$

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Ações

• Acidentais

Vento(sucção): $q_1 = 0,4 \text{ kN} / \text{m}$ Utilização : $q_2 = 1,5 \text{ kN} / \text{m}$ Sobrecarga : $q_3 = 1,0 \text{ kN} / \text{m}$

Solicitações: Momentos no engaste

$$Mq_1 = 0,4 * 4^2 / 2 = 3,2 \text{ kNm}$$

$$Mq_2 = -1,5 * 4^2 / 2 = -12 \text{ kNm}$$

$$Mq_3 = -1 * 4^2 / 2 = -8 \text{ kNm}$$

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Combinações quase-permanentes (tração fibras superiores)

• Combinação 1

Vento(sucção): efeito favorável acidental ($\psi_2 = 0,0$)Utilização : ação incluída ($\psi_2 = 0,4$)Sobrecarga : ação incluída ($\psi_2 = 0,4$)

Peso próprio+ acessórios : ação incluída

$$M_{d,engaste} = \sum_{i=1}^m M_{gk,i} + \sum_{i=1}^n \psi_{2j} M_{qk,j}$$

$$M_{d,engaste} = (-24 - 8) + 0,4 * (-12) + 0,4 * (-8) = -40kNm$$

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Combinações quase-permanentes (tração fibras superiores)

• Combinação 2

Vento(sucção): efeito favorável acidental ($\psi_2 = 0,0$)Utilização : ação não incluída ($\psi_2 = 0,4$)Sobrecarga : ação incluída ($\psi_2 = 0,4$)

Peso próprio+ acessórios : ação incluída

$$M_{d,engaste} = \sum_{i=1}^m M_{gk,i} + \sum_{i=1}^n \psi_{2j} M_{qk,j}$$

$$M_{d,engaste} = (-24 - 8) + 0,4 * (-8) = -35,2kNm$$

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Combinações frequentes (tração fibras superiores)

• Combinação 1

Vento(sucção): efeito favorável accidental $(\psi_2 = 0,0)$
 $(\psi_1 = 0,4)$

Utilização : ação incluída como principal $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Sobrecarga : ação incluída $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Peso próprio+ acessórios : ação incluída

$$M_{d,engaste} = \sum_{i=1}^m M_{gk,i} + \psi_1 M_{qk,1} + \sum_{i=2}^n \psi_{2j} M_{qk,j}$$

$$M_{d,engaste} = (-24 - 8) + 0,6 * (-12) + 0,4 * (-8) = -42,4kNm$$

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Combinações frequentes (tração fibras superiores)

• Combinação 2

Vento(sucção): efeito favorável acidental $(\psi_2 = 0,0)$
 $(\psi_1 = 0,4)$

Utilização : ação incluída $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Sobrecarga : ação incluída como principal $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Peso próprio+ acessórios : ação incluída

$$M_{d,engaste} = \sum_{i=1}^m M_{gk,i} + \psi_1 M_{qk,1} + \sum_{i=2}^n \psi_{2j} M_{qk,j}$$

$$M_{d,engaste} = (-24 - 8) + 0,4 * (-12) + 0,6 * (-8) = -41,6kNm$$

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Combinações frequentes (tração fibras superiores)

• Combinação 3

Vento(sucção): ação incluída como principal $(\psi_2 = 0,0)$
 $(\psi_1 = 0,4)$

Utilização : ação não incluída $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Sobrecarga : ação não incluída $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Peso próprio+ acessórios : ação incluída

$$M_{d,engaste} = \sum_{i=1}^m M_{gk,i} + \psi_1 M_{qk,1} + \sum_{i=2}^n \psi_{2j} M_{qk,j}$$

$$M_{d,engaste} = (-24 - 8) + 0,4 * (3,2) = -30,7 kNm$$

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Combinações raras (tração fibras superiores)

• Combinação 1

Vento(sucção): efeito favorável accidental $(\psi_2 = 0,0)$
 $(\psi_1 = 0,4)$

Utilização : ação incluída como principal $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Sobrecarga : ação incluída $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Peso próprio+ acessórios : ação incluída

$$M_{d,engaste} = \sum_{i=1}^m M_{gk,i} + M_{qk,1} + \sum_{i=2}^n \psi_{1j} M_{qk,j}$$

$$M_{d,engaste} = (-24 - 8) + (-12) + 0,6 * (-8) = -48,8kNm$$

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Combinações raras (tração fibras superiores)

• Combinação 2

Vento(sucção): efeito favorável accidental $(\psi_2 = 0,0)$
 $(\psi_1 = 0,4)$

Utilização : ação incluída $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Sobrecarga: ação incluída como principal $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Peso próprio+ acessórios : ação incluída

$$M_{d,engaste} = \sum_{i=1}^m M_{gk,i} + M_{qk,1} + \sum_{i=2}^n \psi_{1j} M_{qk,j}$$

$$M_{d,engaste} = (-24 - 8) + (-8) + 0,6 * (-12) = -47,2kNm$$

Segurança-ELSCombinações das solicitações de serviço

Exercício-1

Combinações raras (tração fibras superiores)

• Combinação 3

Vento(sucção): ação incluída como principal $(\psi_2 = 0,0)$
 $(\psi_1 = 0,4)$

Utilização : ação não incluída $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Sobrecarga : ação não incluída $(\psi_2 = 0,4)$
 $(\psi_1 = 0,6)$

Peso próprio+ acessórios : ação incluída

$$M_{d,engaste} = \sum_{i=1}^m M_{gk,i} + M_{qk,1} + \sum_{i=2}^n \psi_{1j} M_{qk,j}$$

$$M_{d,engaste} = (-24 - 8) + (3,2) = -28,8kNm$$

Segurança-ELS

Coeficiente de ponderação das Resistências

As resistências devem ser minoradas pelo coeficiente γ_m

Diferenças entre o as resistências do corpo de prova e da resistência na estrutura

Desvios não-previstos entre a construção e os valores de projeto para os materiais

$$\gamma_m = \gamma_{m1} * \gamma_{m2} * \gamma_{m3}$$

Coeficiente de ponderação

Variabilidade das resistências

Valor de cálculo

$$\text{ELS} \left\{ \gamma_m = 1 \right.$$

$$f_{cd} = f_{ck}$$

(Não há minoração do valor característico no Estado limite de Serviço)

Segurança-ELSNíveis de protensão

Classificação (NBR 6118:2003)

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA) e tipo de proteção	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
C. Protendido nível 1 (prot. parcial)	Pré tração c/ CAA I ou Pós c/ CAA I e II	ELS-W $w_k \leq 0,2 \text{ mm}$	Combinação frequente
C. protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré tração c/ CAA II ou Pós tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D*	Combinação quase permanente
C. protendido nível 3 (protensão completa)	Pré tração c/ CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D*	Combinação frequente

Combinações das solicitações Últimas

Classificação (NBR 6118:2003)

▪ **Comb. Normais últimas**

Em cada combinação devem figurar: as ações permanentes e a ação variável principal, com seus valores característicos e as demais ações variáveis, consideradas como secundárias, com seus valores reduzidos de combinação

▪ **Comb. Últimas Especiais ou de Construção**

Em cada combinação devem figurar: as ações permanentes e a ação variável especial, quando existir, com seus valores característicos e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezível de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos de combinação

▪ **Comb. Últimas Excepcionais**

Em cada combinação devem figurar: as ações permanentes e a ação variável excepcional, quando existir, com seus valores representativos e as demais ações variáveis com probabilidade não desprezível de ocorrência simultânea, com seus valores reduzidos de combinação

Segurança-ELU

Combinações das solicitações últimas

Coeficiente de ponderação das ações

As ações devem ser majoradas pelo coeficiente γ_f

Simultaneidade
das ações

Desvios não-previstos
entre a construção e os
valores de projeto para as
ações

$$\gamma_f = \gamma_{f1} * \gamma_{f2} * \gamma_{f3}$$

Coeficiente de
ponderação

Variabilidade das
ações

ELU

$$\gamma_{f1} * \gamma_{f3} \neq 1$$

$$\gamma_{f2} = \psi_0 \text{ Valor reduzido}$$

Combinações Últimas Usuais: Classificação (NBR 6118:2003)

Combinações últimas (ELU)	Descrição	Cálculo das solicitações
Normais	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto armado ¹⁾	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_g F_{gk} + \gamma_q (F_{qk} + \sum \psi_{oj} F_{qjk}) + \gamma_q \psi_o F_{qk}$
	Esgotamento da capacidade resistente para elementos estruturais de concreto protendido	Deve ser considerada, quando necessário, a força de protensão como carregamento externo com os valores $P_{1\max}$ e $P_{1\min}$ para a força desfavorável e favorável respectivamente, conforme definido na seção 9.
	Perda do equilíbrio como corpo rígido	$S(F_{sd}) \geq S(F_{nd}); F_{sd} = \gamma_g G_{sk} + R_d$ $F_{nd} = \gamma_{gn} G_{nk} + \gamma_q Q_{nk} - \gamma_{qs} Q_{s,\min}, \text{ onde: } Q_{nk} = Q_{lk} + \sum \psi_{oj} Q_{jk}$
Especiais ou de construção	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_g F_{gk} + \gamma_q (F_{qk} + \sum \psi_{oj} F_{qjk}) + \gamma_q \psi_o F_{sqk}$	
Excepcionais	$F_d = \gamma_g F_{gk} + \gamma_g F_{gk} + F_{q\text{ext}} + \gamma_q \sum \psi_{oj} F_{qjk} + \gamma_q \psi_o F_{qk}$	

Combinações Últimas Usuais: Definições (NBR 6118:2003)

F_d é o valor de cálculo das ações para combinação última

F_{gk} representa as ações permanentes diretas

F_{zk} representa as ações indiretas permanentes como a retração F_{zqk} e variáveis como a temperatura

F_{zqk}

F_{qk} representa as ações variáveis diretas das quais F_{q1k} é escolhida principal

$\gamma_g, \gamma_{zg}, \gamma_q, \gamma_{zq}$ - ver tabela 12

ψ_{oj}, ψ_{oz} - ver tabela 13

F_{sd} representa as ações estabilizantes

F_{rd} representa as ações não estabilizantes

G_{sk} é o valor característico da ação permanente estabilizante

R_d é o esforço resistente considerado como estabilizante, quando houver

G_{rk} é o valor característico da ação permanente instabilizante

$$Q_{rk} = Q_{1k} + \sum_{j=2}^m \psi_{oj} Q_{jk}$$

Q_{rk} é o valor característico das ações variáveis instabilizantes

Q_{1k} é o valor característico da ação variável instabilizante considerada como principal

$\psi_{oj} Q_{jk}$ são as demais ações variáveis instabilizantes, consideradas com seu valor reduzido.

$Q_{s,min}$ é o valor característico mínimo da ação variável estabilizante que acompanha obrigatoriamente uma ação variável instabilizante

¹⁾ No caso geral, devem ser consideradas inclusive combinações onde o efeito favorável das cargas permanentes seja reduzido pela consideração de $\gamma_g = 1,0$. No caso de estruturas usuais de edifícios essas combinações que consideram γ_g reduzido (1,0) não precisam ser consideradas.

SegurançaCombinações das solicitações últimas

Coef. de ponderação das ações (NBR 6118:2003)

$$\gamma_f = \gamma_{f1} * \gamma_{f3}$$

Combinações de ações	Ações							
	Permanentes (g)		Variáveis (q)		Protensão (p)		Recalques de apoio e retração	
	D ¹⁾	F	G	T	D	F	D	F
Normais	1,4	1,0	1,4	1,2	1,2	0,9	1,2	0
Especiais ou de construção	1,3	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	0
Excepcionais	1,2	1,0	1,0	0	1,2	0,9	0	0

D = desfavorável, F = favorável, G = geral, T = temporária.

1) Para o caso de ações permanentes de pequena variabilidade, o valor 1,4 pode ser reduzido para 1,3

Pequena variabilidade: quando o peso próprio da estrutura corresponde a pelos menos 75% das ações permanentes atuantes nela.

SegurançaCombinações das solicitações últimas

Valores reduzidos das combinações (NBR 6118:2003)

Ações		γ_{f2}
		γ_0
Cargas acidentais de edifícios	Locais em que não há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ²⁾	0,5
	Locais em que há predominância de pesos de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevada concentração de pessoas ²⁾	0,7
	Biblioteca, arquivos, oficinas e garagens	0,8
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6

Segurança-ELU



Combinações das solicitações últimas

Exercício-2

Seja uma viga de concreto armado em balanço de seção transversal 20x60 cm e vão de 4m. As ações permanentes são (peso próprio da estrutura), (peso próprio dos acessórios fixados à viga com valor de 1kN/m); já as ações acidentais são compostas por (carga usual de utilização com valor de 1,5 kN/m), (sobrecarga devido à acumulação de resíduos sólidos 1,0 kN/m) e (vento de sucção com valor de 0,4 kN/m).

Pede-se:

Os valores extremos do momento de cálculo no engaste para os carregamentos normais últimos.

Segurança-ELU

Combinações das solicitações últimas

Exercício-2

Momentos no engaste

- Permanentes

$$Mg_1 = -3 * 4^2 / 2 = -24kNm \quad (\text{Peso Próprio})$$

$$Mg_2 = -1 * 4^2 / 2 = -8kNm \quad (\text{acessórios})$$

- Acidentais

$$Mq_1 = 0,4 * 4^2 / 2 = 3,2kNm \quad \text{Vento(sucção)}$$

$$Mq_2 = -1,5 * 4^2 / 2 = -12kNm \quad (\text{Utilização})$$

$$Mq_3 = -1 * 4^2 / 2 = -8kNm \quad (\text{Sobrecarga})$$

Segurança-ELU

Combinações das solicitações últimas

Exercício-2

- Combinação 1

$$\gamma_q = 1,4$$

Vento(sucção): efeito favorável acidental ($\psi_0 = 0,6$)

Utilização : ação incluída como principal ($\psi_0 = 0,7$)

Sobrecarga : ação incluída ($\psi_0 = 0,7$)

Peso próprio+ acessórios : ação incluída $\gamma_g = 1,4$

$$M_d = \sum_{i=1}^m \gamma_g M_{gk,i} + \gamma_q \left(M_{qk,1} + \sum_{i=2}^n \psi_{0j} M_{qk,j} \right)$$

$$M_d = 1,4 * (-24 - 8) + 1,4 * (-12) + 1,4 * 0,7 * (-8) = -69,4kNm$$

Segurança-ELU

Combinções das solicitações últimas

Exercício-2

- Combinação 2

$$\gamma_q = 1,4$$

Vento(sucção): efeito favorável acidental ($\psi_0 = 0,6$)

Utilização : ação incluída ($\psi_0 = 0,7$)

Sobrecarga : ação incluída como principal ($\psi_0 = 0,7$)

Peso próprio+ acessórios : ação incluída $\gamma_g = 1,4$

$$M_d = \sum_{i=1}^m \gamma_g M_{gk,i} + \gamma_q \left(M_{qk,1} + \sum_{i=2}^n \psi_{0j} M_{qk,j} \right)$$

$$M_d = 1,4 * (-24 - 8) + 1,4 * (-8) + 1,4 * 0,7 * (-12) = -67,7 kNm$$

Segurança-ELU

Combinções das solicitações últimas

Exercício-2

- Combinação 3

$$\gamma_q = 1,4$$

Vento(sucção): ação incluída como principal ($\psi_0 = 0,6$)

Utilização : ação não-incluída ($\psi_0 = 0,7$)

Sobrecarga : ação não-incluída ($\psi_0 = 0,7$)

Peso próprio+ acessórios : ação incluída $\gamma_g = 1,0$

$$M_d = \sum_{i=1}^m \gamma_g M_{gk,i} + \gamma_q \left(M_{qk,1} + \sum_{i=2}^n \psi_{0j} M_{qk,j} \right)$$

$$M_d = 1,0 * (-24 - 8) + 1,4 * (3,2) = -27,5 kNm$$

Segurança-ELU

Coeficiente de ponderação das Resistências

As resistências devem ser minoradas pelo coeficiente γ_m

Diferenças entre o as resistências do corpo de prova e da resistência na estrutura

Desvios não-previstos entre a construção e os valores de projeto para os materiais

$$\gamma_m = \gamma_{m1} * \gamma_{m2} * \gamma_{m3}$$

Coeficiente de ponderação

Variabilidade das resistências

$$\text{ELU} \left\{ \gamma_m = 1,4 \right.$$

Valor de cálculo

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_m$$