



ELU e Segurança Estrutural

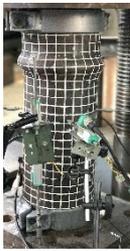


Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Mestrado Acadêmico / Doutorado

Faculdade de Engenharia – FEN/UERJ

Professor: Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

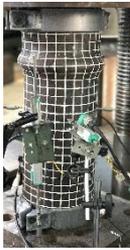


1. Introdução

- Normas utilizadas

- ✓ EN 1993 → Eurocódigo 3: Dimensionamento de Estruturas de Aço (abreviado como EC3) é dividido nas seguintes partes:

- EN 1993-1 Regras gerais e regras para edificações;
- EN 1993-2 Pontes em aço;
- EN 1993-3 Torres, mastros e chaminés;
- EN 1993-4 Silos, tanques e dutovias;
- EN 1993-5 Estacas;
- EN 1993-6 Estruturas de suporte a guias e guindastes.

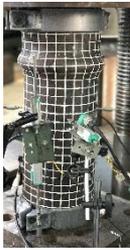


1. Introdução

■ Normas utilizadas

✓ EN 1993 → Eurocódigo 3: Dimensionamento de Estruturas de Aço (abreviado como EC3) é dividido nas seguintes 12 sub-partes:

- EN 1993-1-1 Regras gerais e regras para edificações;
- EN 1993-1-2 Dimensionamento sob situação de incêndio;
- EN 1993-1-3 Elementos e chapas finas formados a frio;
- EN 1993-1-4 Aços inoxidáveis;
- EN 1993-1-5 Elementos estruturais formados com placas;
- EN 1993-1-6 Resistência e estabilidade de cascas estruturais;
- EN 1993-1-7 Resistência e estabilidade de placas de aço sob carregamentos transversais;



1. Introdução

- Normas utilizadas

✓ EN 1993 → Eurocódigo 3: Dimensionamento de Estruturas de Aço (abreviado como EC3) é dividido nas seguintes 12 sub-partes:

- EN 1993-1-8 Dimensionamento de ligações estruturais;
- EN 1993-1-9 Resistência à fadiga de estruturas de aço;
- EN 1993-1-10 Tenacidade dos materiais e propriedades no sentido da espessura;
- EN 1993-1-11 Dimensionamento de estruturas com elementos de aço tracionados;
- EN 1993-1-12 Regras suplementares para aço de alta resistência.

Mais normas suplementares...

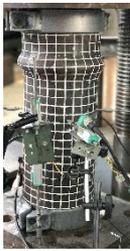


2. Fundamentos de Projeto

- Antigamente → **Tensões Admissíveis** → origem na **Resistência dos Materiais** → ASD (Allowable Stress Design) ou WSD (Working Stress Design)
- Satisfatório → máxima tensão atuante σ em cada **seção** → **inferior** a uma **tensão resistente** reduzida por um **coeficiente de segurança** γ

$$\sigma_{\text{máx}} < \bar{\sigma} = \frac{f_{yk}}{\gamma}$$

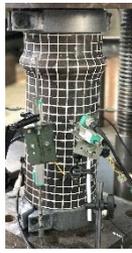
- As **tensões** são calculadas a partir dos esforços solicitantes (**momento fletor, esforço normal, etc.**)



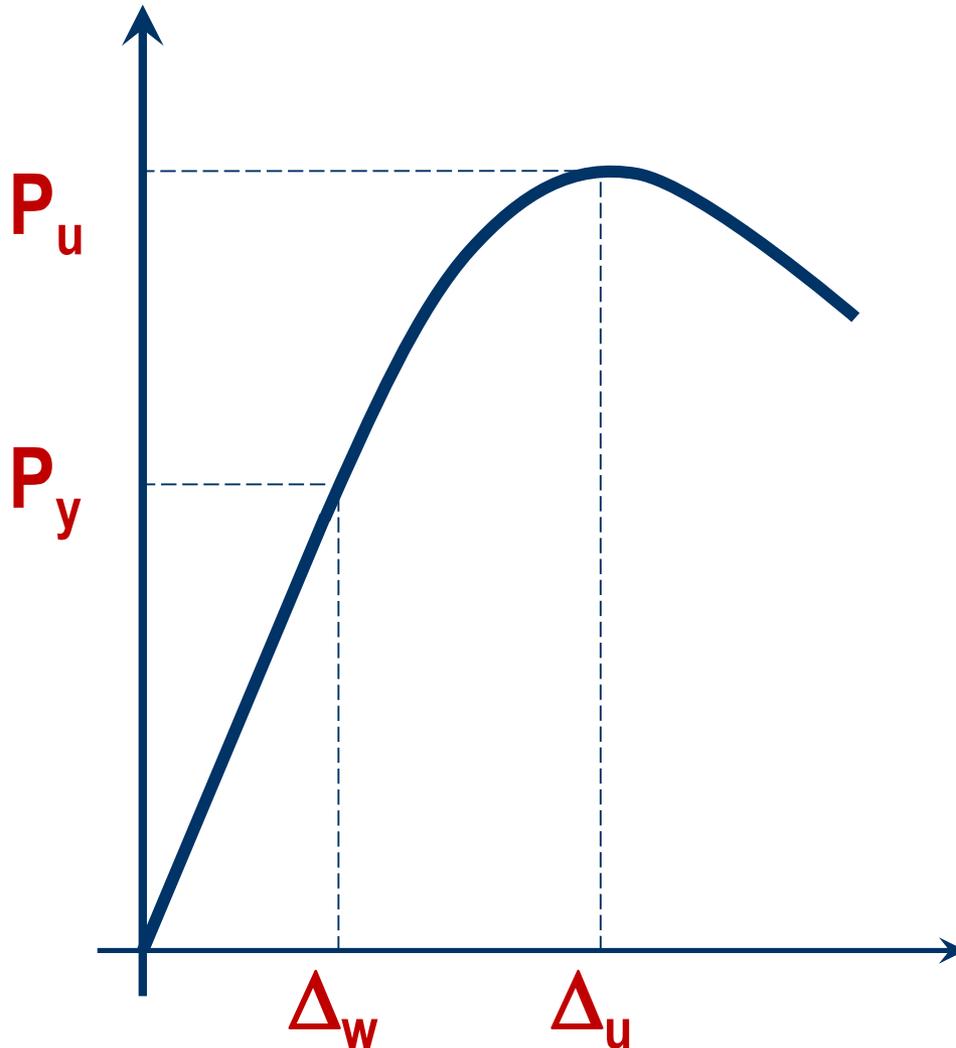
2. Fundamentos de Projeto

■ Limitações

- ✓ **Coeficiente de segurança único** → expressar todas as incertezas, independentemente de sua origem
- ✓ Em sua origem, o método previa a **análise estrutural em regime elástico** com o limite associado ao início da plastificação da seção mais solicitada
- ✓ **Não** se consideravam **reservas de resistência** existentes após o início da plastificação, nem a **redistribuição de momentos fletores** causada pela plastificação de uma ou mais seções da estrutura hiperestática
- ✓ **Efeitos de segunda ordem**



2. Fundamentos de Projeto

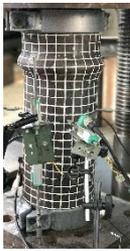


$$P_u / P_y = 1,38$$

$$\Delta_u / \Delta_w = 1,86$$

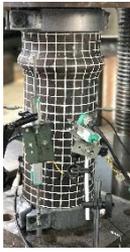
Seguro? Nem sempre

Econômico? Jamais



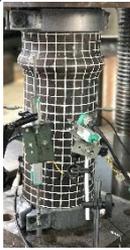
2. Fundamentos de Projeto

- Requisitos básicos → EN 1990 → **estrutura deve ser dimensionada e executada** → desempenhar as **funções** → concebida → **vida útil pré-determinada**
- Possíveis modos de colapso (**estados limites últimos - ELU**) são verificados
- E também, condições que garantem seu **desempenho correto sob serviço** (**estados limites de utilização - ELS**)
- E aquelas relativas a sua **durabilidade** (entre outras, proteção contra corrosão) são plenamente atendidas.



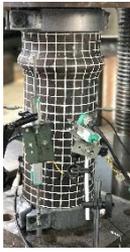
2. Fundamentos de Projeto

- As soluções para atender a estas condições básicas englobam:
 - ✓ escolha de **materiais** adequados
 - ✓ **dimensionamento** e **detalhamento** da estrutura e de seus componentes de forma apropriada
 - ✓ estabelecimento de **métodos para controle e fiscalização** das **etapas de dimensionamento, execução e utilização**



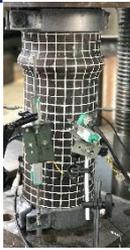
2. Fundamentos de Projeto

- **ELU** → colapso de parte ou da totalidade da estrutura, colocando em risco a segurança das pessoas
 - ✓ perda de equilíbrio considerando a estrutura como um corpo rígido
 - ✓ colapso por deformação excessiva
 - ✓ transformação da estrutura ou de parte dela em um mecanismo
 - ✓ ruptura
 - ✓ perda de estabilidade
 - ✓ ruínas devido a fadiga ou quaisquer outros efeitos dependente do tempo



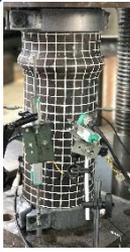
2. Fundamentos de Projeto

- **ELS** → as condições específicas de utilização deixam de ser verificadas:
 - ✓ como a relativa à funcionalidade da estrutura
 - ✓ conforto de seus ocupantes
 - ✓ condições de aparência aceitáveis



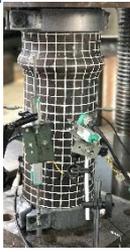
2. Fundamentos de Projeto

- **ELU** → situações de projeto e dimensionamento → circunstâncias requeridas para que a estrutura desempenhe suas funções:
 - ✓ situações **permanentes** de dimensionamento (peso próprio, dos equipamentos fixos, entre outras)
 - ✓ situações **variáveis** de dimensionamento (sobrecargas nos pavimentos, a ação do vento, ação sísmica ou da neve)
 - ✓ situações **excepcionais** de dimensionamento (ação do fogo ou de explosões)
 - ✓ situações de **dimensionamento sísmico**.
 - ✓ Efeitos que dependem do **tempo** → **fadiga** → tempo de **vida útil** para o qual a estrutura será dimensionada.



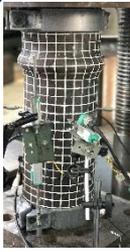
3. Confiabilidade

- O dimensionamento e a execução de estruturas de aço → **nível de confiabilidade adequado** para a estrutura considerada
- Escolha apropriada do processo de gestão da qualidade no dimensionamento e na execução de acordo com a EN 1990 e a EN 1090
- Os níveis de **confiabilidade** associados à **resistência estrutural** e ao seu **desempenho em serviço** podem ser atingidos com combinações adequadas das seguintes medidas:



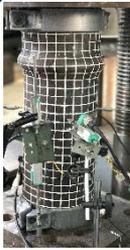
3. Confiabilidade

- ✓ medidas **preventivas** e de **proteção** → implementação de barreiras de segurança, medidas de proteção contra fogo ativas ou passivas, proteção contra riscos de corrosão
- ✓ medidas associadas a recomendações de **dimensionamento** → valores representativos das ações ou fatores parciais
- ✓ medidas associadas a gestão da **qualidade**
- ✓ medidas objetivando a **redução de erros humanos** no dimensionamento e execução



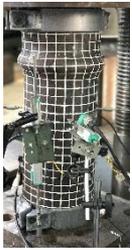
3. Confiabilidade

- ✓ outras medidas relativas a aspectos como **requisitos básicos**, grau de **robustez**, **durabilidade**, influência do **solo**, **terreno** e ambiente, **precisão** dos **modelos mecânicos** usados para o detalhamento da estrutura
- ✓ medidas que levem a uma **execução eficiente**, de acordo com as normas de execução (em particular a EN 1090)
- ✓ medidas que levem a uma **inspeção** e **manutenção** adequadas



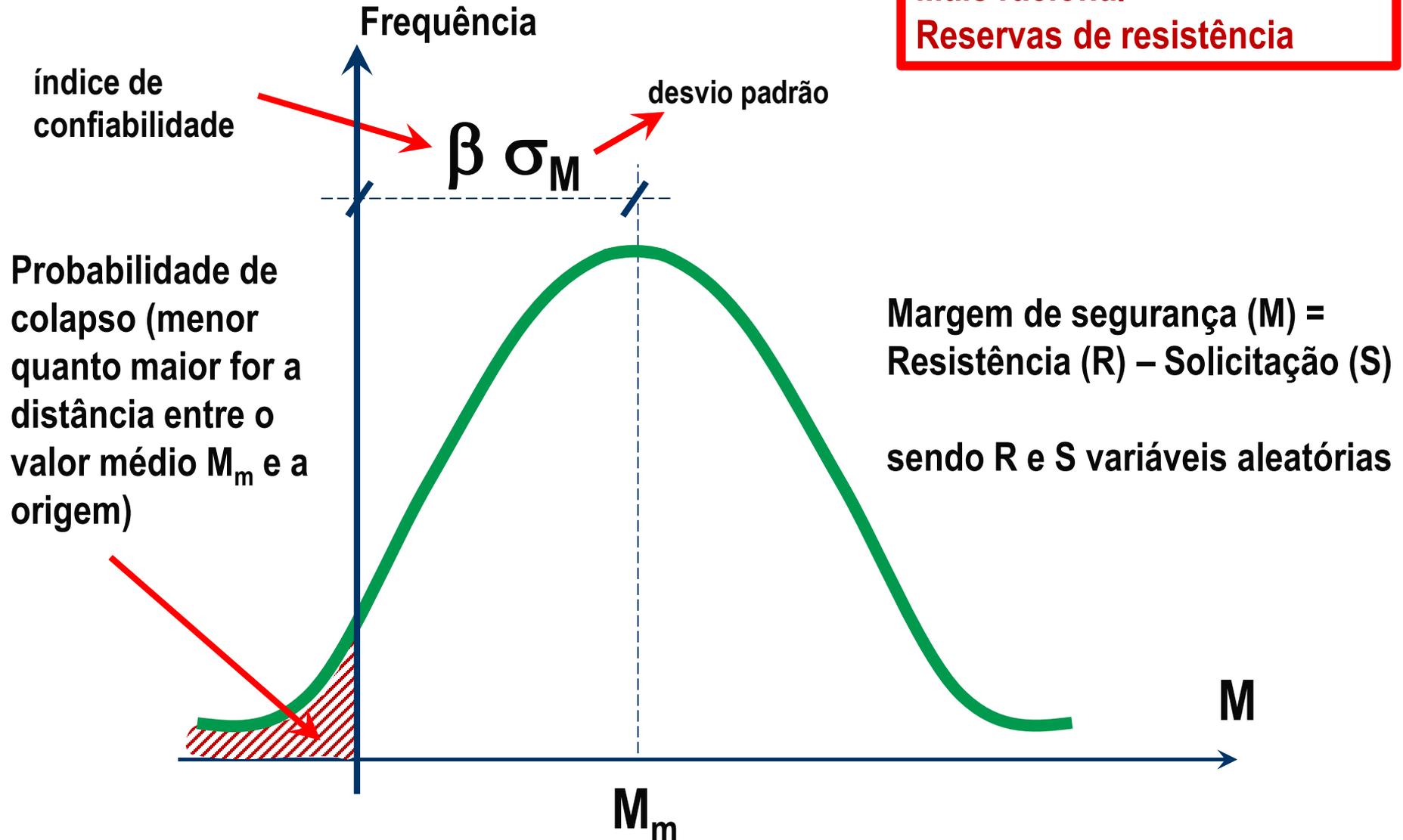
3. Confiabilidade

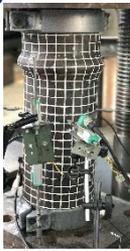
- Classes de **confiabilidade** → **RC1**, **RC2** e **RC3** → valores do **índice de confiabilidade** β → período de recorrência de 50 anos → **3,3**, **3,8** e **4,3** respectivamente
- β → avaliado de acordo com o anexo C do EN 1990, sendo dependente da **variabilidade estatística das ações, resistências e das incertezas dos modelos**
- O dimensionamento de uma estrutura → EC3-1-1, → **coeficientes parciais** (γ_M) do EN 1990 → estruturas com $\beta > 3,8$ → recorrência de 50 anos → classe de confiabilidade **não menor que a RC2**



3. Confiabilidade

Consideração das incertezas
Mais racional
Reservas de resistência

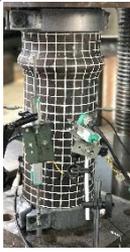




3. Confiabilidade

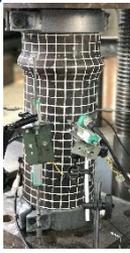
- Classes de **confiabilidade** → RC1, RC2 e RC3 → associadas as **três classes de consequências** → **CC1, CC2 e CC3**

Classe de consequências	Descrição	Exemplos de edifícios e de obras de engenharia civil
CC3	Consequência elevada em termos de perda de vidas humanas; ou consequências econômicas, sociais ou ambientais muito importantes.	Arquibancadas, edifícios públicos em que as consequências do colapso são elevadas (por exemplo, uma sala de concertos).
CC2	Consequência média em termos de perda de vidas humanas; consequências econômicas, sociais ou ambientais mediamente importantes.	Edifícios para habitação ou para escritórios, edifícios públicos em que as consequências do colapso são médias (por exemplo, um edifício de escritórios).
CC1	Consequência baixa em termos de perda de vidas humanas; e consequências econômicas, sociais ou ambientais pouco importantes ou desprezíveis.	Edifícios agrícolas normalmente não ocupados permanentemente por pessoas (por exemplo, armazéns, estufas).



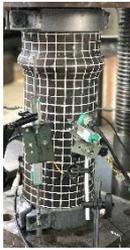
3. Confiabilidade

- Classes de **confiabilidade** → relação com **classes de execução** → **EXC1, EXC2, EXC3 e EXC4**
- Classes de **execução** para uma estrutura de aço → categorias de **produção** e categorias de **serviço** → ligação com as classes de **consequência** → consequentemente → classes de **confiabilidade**
- Categorias de **serviço**
 - ✓ **SC1** → Estruturas → **ações** quase estáticas ou com ações sísmicas e de fadiga **reduzidas**
 - ✓ **SC2** → Estruturas → **ações** sísmicas e/ou fadiga elevadas → regiões → **sísmicas médias a altas**



3. Confiabilidade

- Categorias de **produção**
 - ✓ **PC1** → Estruturas **sem** componentes soldados ou com componentes soldados → aços **$f_y < 355 \text{ MPa}$**
 - ✓ **PC2** → Estruturas **com** componentes soldados → **$f_y > 355 \text{ MPa}$** ou superiores ou outros componentes:
 - componentes essenciais para integridade estrutural montados com soldas executadas no local da construção
 - componentes formados a quente ou que tenham recebido tratamento térmico durante a fabricação
 - componentes de vigas treliçadas compostas com perfis tubulares CHS que necessitem de cortes nas extremidades dos perfis

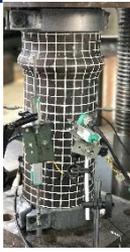


3. Confiabilidade

- A **matriz recomendada** → determinação das classes de execução de uma estrutura de aço, após a definição das **classes de produção, serviço e consequência**

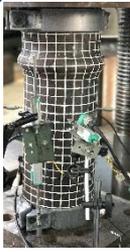
Classes de consequência		CC1		CC2		CC3	
Categorias de serviço		SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2
Categorias de Produção	PC1	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 ^{a)}	EXC3 ^{a)}
	PC2	EXC2	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 ^{a)}	EXC4

a) EXC4 deve ser aplicada a estruturas especiais ou a estruturas associadas a colapsos com consequências extremas, como estabelecido por determinações nacionais.



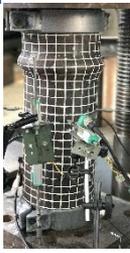
4. Variáveis Básicas

- As **variáveis básicas** envolvidas no dimensionamento de uma estrutura através do método dos estados limites são:
 - ✓ **ações**
 - ✓ as propriedades dos **materiais**
 - ✓ dados **geométricos** das estruturas, seus **elementos** e
 - ✓ **ligações**



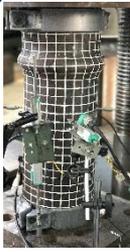
4. Variáveis Básicas

- Verificações mandatórias → **nenhum estado limite relevante seja excedido** → executadas em todas as situações de dimensionamento relevantes onde o **método dos coeficientes parciais** for usado
- Isto deve ser particularmente assegurado para os **valores de dimensionamento relativos às ações**, ou no **uso dos efeitos das ações e resistências em modelos de dimensionamento**



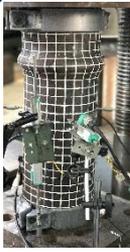
5. Ações

- Situações de dimensionamento selecionadas → ações individuais para os casos críticos de **carga** devem ser **combinadas**
- Combinações de carregamento são baseadas em valores de dimensionamento para as ações
- Os valores de dimensionamento das ações F_d são obtidos a partir de valores representativos F_{rep}
- Em geral → valores característicos F_k são adotados → considerando coeficientes de segurança parciais adequados γ_f → $F_d = \gamma_f F_{rep}$



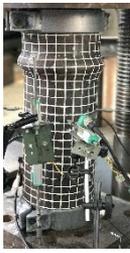
5. Ações

- Os **valores característicos das ações** (permanentes, variáveis ou excepcionais) → como um valor médio, um valor superior ou inferior, ou mesmo um valor nominal, dependente da **distribuição estatística**
- Para **ações variáveis** → valores representativos devem ser definidos → de **combinação, frequentes** e **quase permanentes** → valores característicos, através dos fatores ψ_0 , ψ_1 e ψ_2 , respectivamente
- Então $F_{rep} = \psi F_k$ → e o valor de cálculo $F_d = \gamma_f \psi F_k$



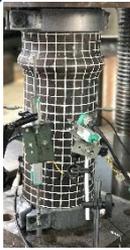
5. Ações

- Os efeitos das **ações** no dimensionamento, como as **forças internas** (forças axiais, momentos fletores, força cortante, entre outras) → uso de **método de análise adequado** → usando **valores** de **dimensionamento** e de **combinações** das **ações adequados** como especificado na EN 1990



6. Materiais

- As propriedades dos **materiais** → representadas por **valores característicos** superiores e inferiores
- Dados **estatísticos** disponíveis sejam **insuficientes** → valores nominais → adotados como valores característicos
- Os valores das **propriedades** dos **materiais** de dimensionamento são obtidos a partir dos **valores característicos** divididos pelos coeficientes de segurança parciais apropriados γ_M , fornecidos pelas normas relativas a cada material → EC3 → estruturas de aço



6. Materiais

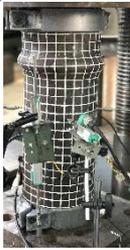
- Os valores dos **coeficientes de segurança parciais** $\gamma_M \rightarrow$ modo de colapso \rightarrow Anexos Nacionais
- Valores recomendados no EC3-1-1 são

$$\gamma_{M0} = 1,00$$

$$\gamma_{M1} = 1,00$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

- Valores das propriedades dos materiais devem ser determinados a partir de testes padronizados executados sob condições específicas



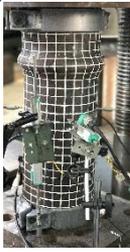
7. ELU

- Em geral as verificações dos estados limites últimos
→ verificação da condição

$$E_d \leq R_d$$

onde E_d é o **valor de dimensionamento das ações**, como as forças internas e R_d representa o **valor de dimensionamento da resistência** correspondente

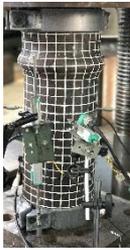
- O valor de dimensionamento das ações E_d → combinações dos valores das ações que podem ocorrer simultaneamente.



7. ELU

■ Relembrando:

- ✓ combinações de ações para situações de dimensionamento permanentes ou variáveis (combinações fundamentais)
- ✓ combinações de ações para situações de dimensionamento excepcionais
- ✓ combinações de ações para situações de dimensionamento sísmico

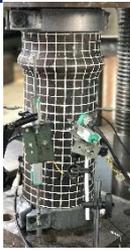


8. ELS

- A verificação dos estados limites de utilização consiste na verificação da condição

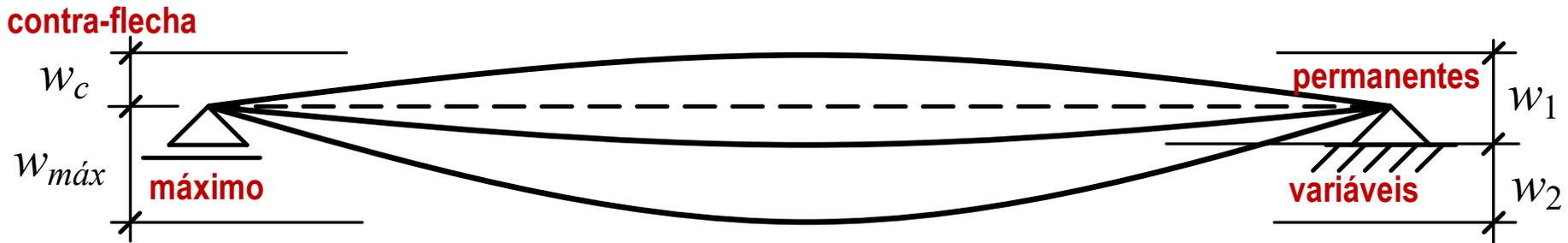
$$E_d \leq C_d$$

onde E_d é o **valor de dimensionamento do efeito das ações** especificado no critério de serviço, determinado pelas combinações relevantes, e C_d é o **valor limite de dimensionamento do critério de serviço relevante** (por exemplo, um valor máximo de deslocamento)

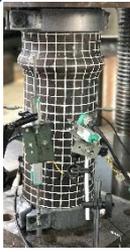


8. ELS

- Valores recomendados típicos para a verificação → **ELS** → para deslocamentos verticais em vigas

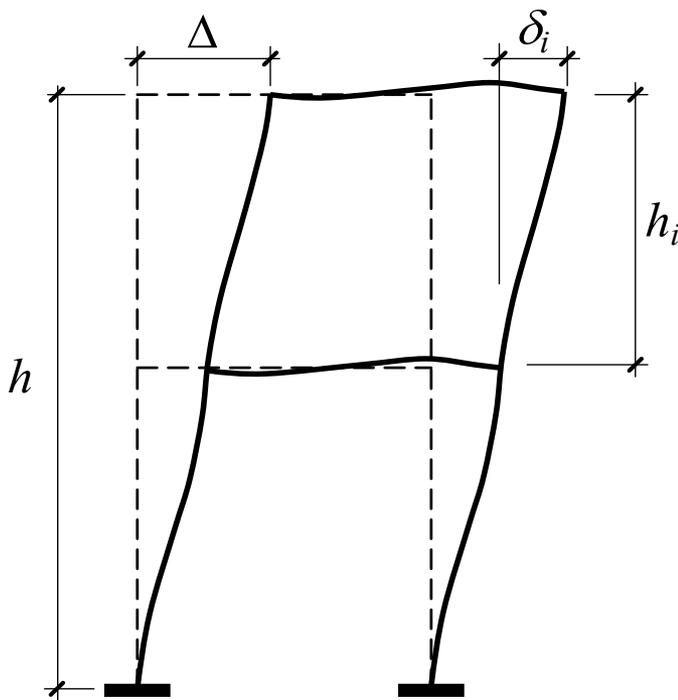


	$w_{máx}$	w_2
Coberturas em geral	$L/200$	$L/250$
Coberturas utilizadas frequentemente por pessoas	$L/250$	$L/300$
Pavimentos em geral	$L/250$	$L/300$
Pavimentos e coberturas que suportem rebocos, ou outros acabamentos frágeis ou divisórias não flexíveis	$L/250$	$L/350$
Pavimentos que suportem colunas (a não ser que o deslocamento tenha sido incluído na análise global para o estado limite último)	$L/400$	$L/500$
Quando $w_{máx}$ possa afetar o aspecto do edifício	$L/250$	-
Vigas em balanço ($L = 2 L_{balanço}$)	Limites anteriores	



8. ELS

- Valores recomendados típicos para a verificação → ELS → deslocamentos horizontais em estruturas de andares múltiplos



$$\delta_i \leq h_i / 300$$

$$\Delta \leq h / 500$$



9. Combinações de Ações

- Combinações de ações para situações de projeto persistentes ou transitórias (combinações fundamentais) - **ELU**

- O formato geral:

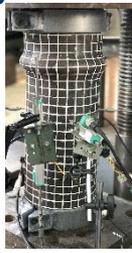
$$E_d = \gamma_{Sd} E \left\{ \gamma_{G,j} G_{k,j}; \gamma_P P; \gamma_{Q,1} Q_{k,1}; \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\} \quad j \geq 1; i > 1$$

→ G – permanente
 → P – ação de protensão
 → Q - variáveis

- As combinações dos efeitos das ações a considerar deverão basear-se

$$E_d = E \left\{ \gamma_{G,j} G_{k,j}; \gamma_P P; \gamma_{Q,1} Q_{k,1}; \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\} \quad j \geq 1; i > 1$$

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$



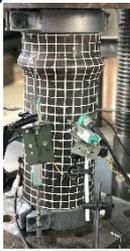
9. Combinações de Ações

- Combinações de ações para situações de projeto → adequadas aos requisitos de utilização e aos critérios de desempenho a verificar – **ELS** → **coeficientes parciais iguais a 1,0**

- Combinação característica → estados limites irreversíveis

$$E_d = E \left\{ G_{k,j} ; P ; Q_{k,1} ; \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\} \quad j \geq 1 ; i > 1$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$



9. Combinações de Ações

- Combinação frequente \rightarrow estados limites reversíveis

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; \psi_{1,1} Q_{k,1}; \psi_{2,1} Q_{k,1}\} \quad j \geq 1; i > 1$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- Combinação quase-permanente \rightarrow longo prazo e aspecto

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; \psi_{2,1} Q_{k,1}\} \quad j \geq 1; i \geq 1$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$



9. Combinações de Ações

Valores recomendados para os coeficientes ψ para edifícios

Acção	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecargas em edifícios (ver a EN 1991-1-1)			
Categoria A: zonas de habitação	0,7	0,5	0,3
Categoria B: zonas de escritórios	0,7	0,5	0,3
Categoria C: zonas de reunião de pessoas	0,7	0,7	0,6
Categoria D: zonas comerciais	0,7	0,7	0,6
Categoria E: zonas de armazenamento	1,0	0,9	0,8
Categoria F: zonas de tráfego, peso dos veículos ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Categoria G: zonas de tráfego, 30 kN $<$ peso dos veículos ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Categoria H: coberturas	0	0	0
Acção da neve em edifícios (ver a EN 1991-1-3) ^{*)}			
– Finlândia, Islândia, Noruega, Suécia	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H > 1000$ m acima do nível do mar	0,70	0,50	0,20
– Restantes Estados-Membros do CEN, para obras localizadas à altitude $H \leq 1000$ m acima do nível do mar	0,50	0,20	0
Acção do vento em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperatura (excepto incêndio) em edifícios (ver a EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0



9. Combinações de Ações

Valores de cálculo das ações (EQU) (Conjunto A)

Situações de projecto persistentes e transitórias	Acções permanentes		Acção variável de base da combinação ^{*)}	Acções variáveis acompanhantes	
	Desfavoráveis	Favoráveis		Principais (caso existam)	Outras
(Expressão 6.10)	$\gamma_{Cj,sup} G_{kj,sup}$	$\gamma_{Cj,inf} G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

^{*)} As acções variáveis são as consideradas no Quadro A1.1.

NOTA 1: Os valores de γ poderão ser definidos no Anexo Nacional. O conjunto de valores recomendados para γ é:

$$\gamma_{Cj,sup} = 1,10$$

$$\gamma_{Cj,inf} = 0,90$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,50 \text{ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)}$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,50 \text{ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)}$$

NOTA 2: Nos casos em que a verificação do equilíbrio estático também envolva a resistência dos elementos estruturais, como alternativa às duas verificações separadas baseadas nos Quadros A1.2(A) e A1.2(B) poderá ser adoptada uma verificação combinada, caso o Anexo Nacional o permita, baseada no Quadro A1.2(A) e com o seguinte conjunto de valores recomendados, que poderão ser alterados nesse Anexo:

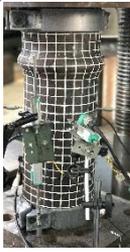
$$\gamma_{Cj,sup} = 1,35$$

$$\gamma_{Cj,inf} = 1,15$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,50 \text{ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)}$$

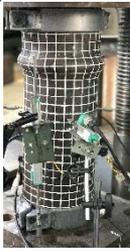
$$\gamma_{Q,1} = 1,50 \text{ nos casos desfavoráveis (0 nos casos favoráveis)}$$

desde que a aplicação de $\gamma_{Cj,inf} = 1,00$, tanto às parcelas favoráveis como desfavoráveis das acções permanentes, não produza um efeito mais desfavorável.



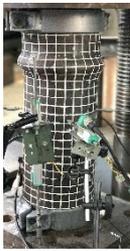
9. Imperfeições – 2ª Ordem

- As estruturas de aço são usualmente estruturas esbeltas quando comparadas a estruturas com outros materiais
- Fenômenos de instabilidade estão potencialmente presentes, logo é normalmente necessário determinar a estabilidade global da estrutura ou de suas partes
- Esta verificação gera a necessidade de executar uma análise de 2ª ordem, considerando as imperfeições I
- Introdução de esforços secundários adicionais → inseridos na análise global e dimensionamento das estruturas



9. Imperfeições – 2ª Ordem

- a) uma análise global → diretamente todas as imperfeições (geométricas e do material) e todos os efeitos de 2ª ordem (método 1 – GMNIA - Análise Não linear Geométrica e do Material com Imperfeições);
- b) uma análise global → parcialmente as imperfeições (imperfeições estruturais globais) e efeitos de 2ª ordem (efeitos globais) → considera as imperfeições nas verificações dos elementos (método 2 → mais usado);
- c) casos básicos → verificações individuais de estabilidade em elementos equivalentes → comprimentos de flambagem **apropriados** correspondendo ao modo de flambagem global da estrutura (método 3) → limitações



9. Imperfeições – 2ª Ordem

- Divisão dos efeitos de segunda ordem em efeitos P- δ (efeitos locais no elemento) e efeitos P- Δ (efeitos globais na estrutura)

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m$$

$$\phi_0 = 1/200$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \text{ mas } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$$

m é o número de colunas do pórtico, incluindo somente as colunas que suportam uma carga vertical N_{Ed} maior ou igual a 50% do valor médio do esforço axial nas colunas contidas no plano vertical considerado

Observa-se que em pórticos deslocáveis, as imperfeições podem ser desprezadas sempre que $H_{Ed} \geq 0,15 V_{Ed}$



11. Exemplo - Combinações de Ações

Exemplo 2.4.A: Considere o pórtico de aço do exemplo 2.1 ($E = 210 \text{ GPa}$) sob a ação de carregamentos desponderados ilustrado na figura 2.58, onde:

AP – carga permanente ($\gamma_G = 1,35$);

AV_1 – sobrecarga 1 ($\gamma_Q = 1,50$, $\psi_{0,1} = 0,7$, $\psi_{1,1} = 0,5$, $\psi_{2,1} = 0,3$);

AV_2 – sobrecarga 2 ($\gamma_Q = 1,50$, $\psi_{0,2} = 0,6$, $\psi_{1,2} = 0,2$, $\psi_{2,2} = 0,0$). (**vento**)

Calcule através de uma análise elástica os esforços internos de projeto referentes a verificações dos Estados Limites Últimos (ELU), e os deslocamentos usados nas verificações dos Estados Limites de Utilização (ELS), de acordo com o EC3-1-1. Assuma que as ligações entre as vigas e as colunas são rígidas e que a placa de base é engastada.

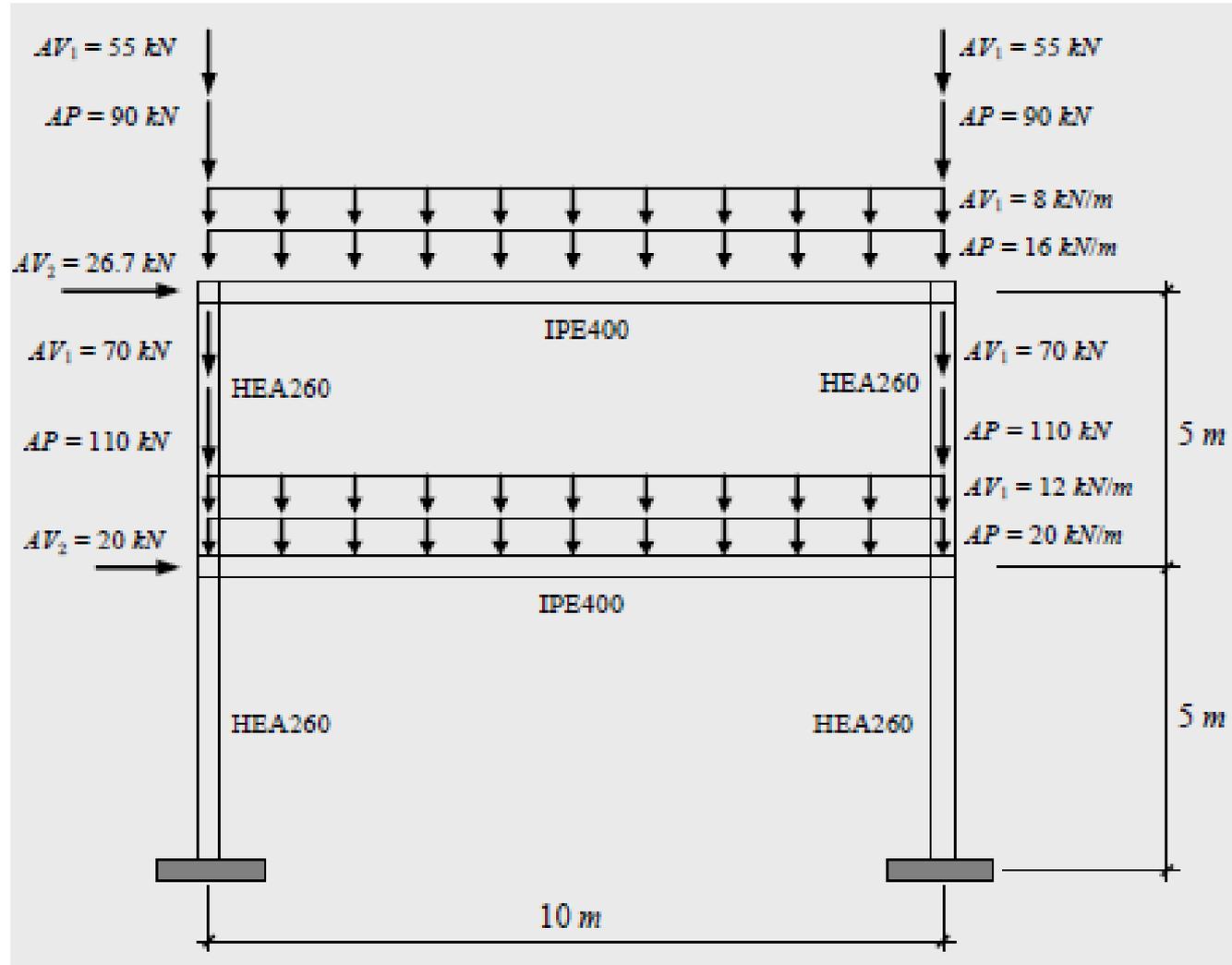
Slide 38 →

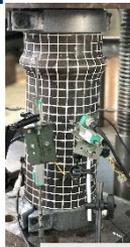
$$\begin{aligned} \gamma_{G,\text{sup}} &= 1,35 \\ \gamma_{G,\text{inf}} &= 1,15 \\ \gamma_{Q,1} &= 1,50 \\ \gamma_{Q,2} &= 1,50 \end{aligned}$$

Acção	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Categoria A: zonas de habitação	0,7	0,5	0,3
Acção do <u>vento</u> em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0



10. Exemplo - Combinações de Ações





10. Exemplo - Combinações de Ações

Duas sobrecargas independentes são aplicadas a estrutura (AV_1 e AV_2), conseqüentemente a estrutura é analisada para duas combinações de carregamentos (de acordo com o EN 1990), ou seja:

Combinação 1 – Carga permanente mais a sobrecarga 1 (AV_1) tomada como ação variável principal.

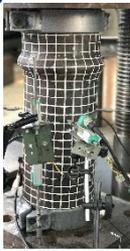
$$Ed_1 = \underset{1,35}{\gamma_G} AP + \underset{1,50}{\gamma_Q} (AV_1 + \underset{0,6}{\psi_{0,2}} AV_2).$$

Combinação 2 – Carga permanente mais a sobrecarga 2 (AV_2) tomada como ação variável principal.

$$Ed_2 = \underset{1,35}{\gamma_G} AP + \underset{1,50}{\gamma_Q} (AV_2 + \underset{0,7}{\psi_{0,1}} AV_1).$$

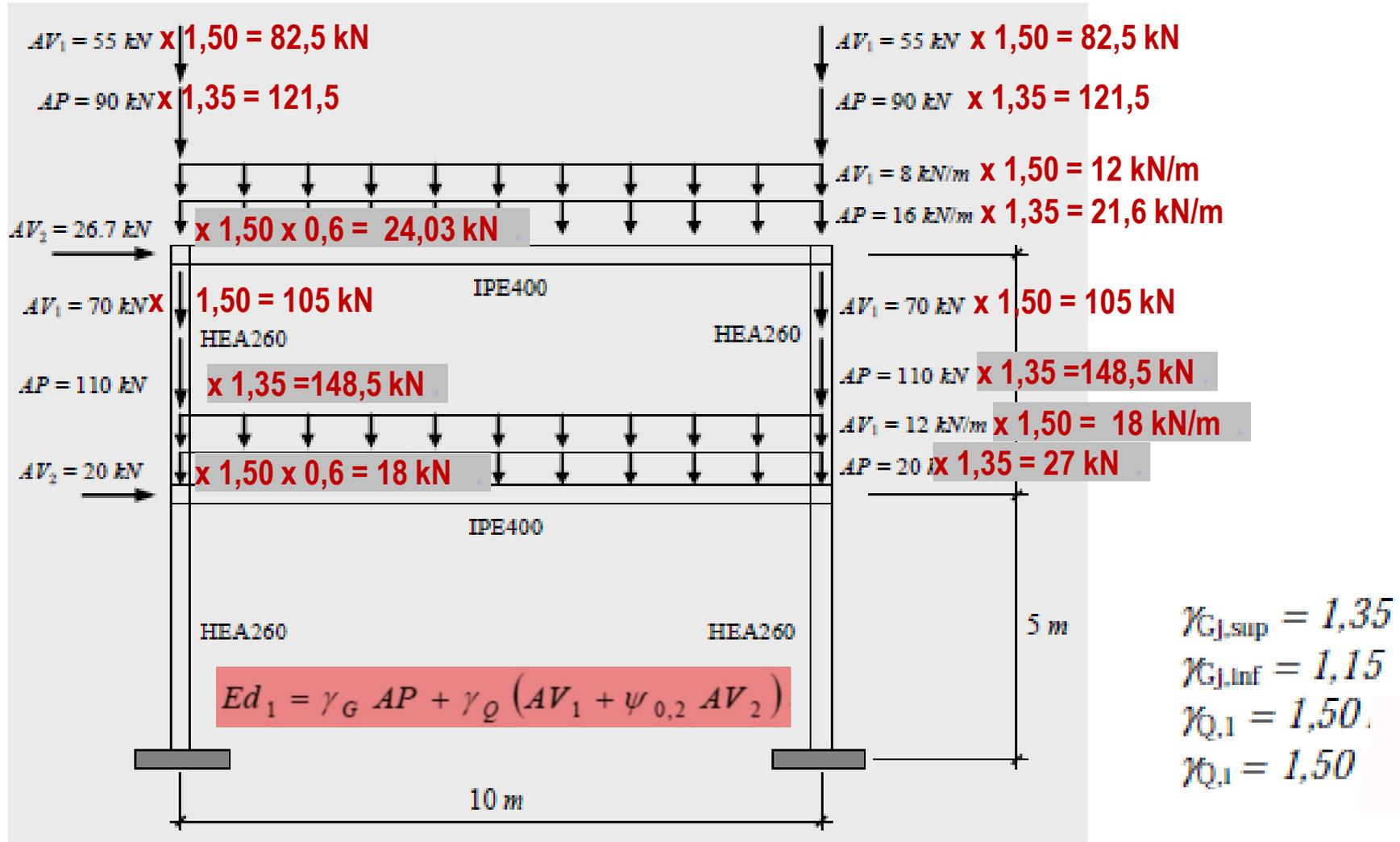
$$\begin{aligned} \gamma_{G,\text{sup}} &= 1,35 \\ \gamma_{G,\text{inf}} &= 1,15 \\ \gamma_{Q,1} &= 1,50 \\ \gamma_{Q,2} &= 1,50 \end{aligned}$$

Ação	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Categoria A: zonas de habitação	0,7	0,5	0,3
Acção do vento em edifícios (ver a EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0



10. Exemplo - Combinações de Ações

Combinação 1 - carga permanente mais AV_1 como ação variável principal





10. Exemplo - Combinações de Ações

Em uma primeira etapa calculam-se as forças adicionais horizontais advindas das imperfeições definidas na cláusula 5.3.2. Na análise, somente as imperfeições globais são consideradas, assumindo que as imperfeições locais serão incluídas no dimensionamento dos elementos a flambagem (como estabelecido na cláusula 6.3).

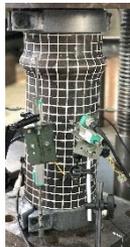
A “imperfeição geométrica equivalente”, correspondente às imperfeições globais do pórtico, é definida pelo ângulo ϕ e: $\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m$.

Assumindo: $\phi_0 = 1/200$;

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{10}} = 0,63 < \frac{2}{3} = 0,67 \Rightarrow \alpha_h = 0,67 \text{ e}$$

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)} = \sqrt{0,5 \times \left(1 + \frac{1}{2} \right)} = 0,87 ,$$

logo, $\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m = 1/200 \times 0,67 \times 0,87 = 0,0029 \text{ rad} .$



10. Exemplo - Combinações de Ações

A falta de verticalidade das colunas, dada pela imperfeição ϕ , pode ser incorporada na análise através do uso de forças horizontais equivalentes, aplicadas no nível de cada pavimento, sendo proporcionais às cargas verticais aplicadas neste nível. Estas forças são então somadas às cargas horizontais especificadas, como será apresentado a seguir, para as duas combinações de carregamento.

Combinação 1 (carga permanente mais AV_1 como ação variável principal).

A carga vertical de projeto aplicada no 1º pavimento, é:

$$1,35 \times (20 \times 10 + 2 \times 110) + 1,50 \times (12 \times 10 + 2 \times 70) = 957,0 \text{ kN} ,$$

$$\text{logo, } F_{i1,comb 1} = 0,0029 \times 957,0 = 2,8 \text{ kN} .$$

Similarmente, a carga vertical de projeto aplicada no 2º pavimento, é:

$$1,35 \times (16 \times 10 + 2 \times 90) + 1,5 \times (8 \times 10 + 2 \times 55) = 744,0 \text{ kN} ,$$

$$\text{logo, } F_{i2,comb 1} = 0,0029 \times 744,0 = 2,2 \text{ kN} .$$



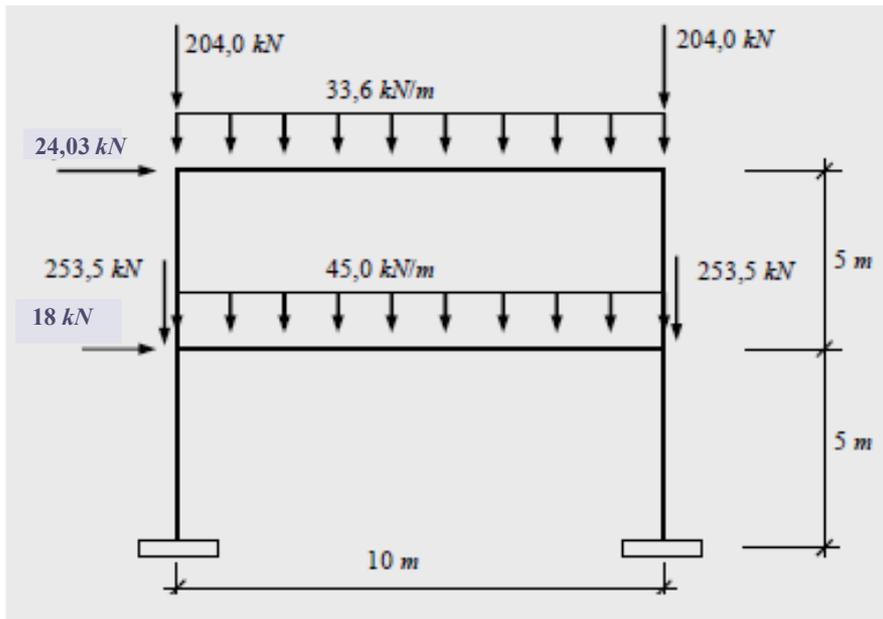
10. Exemplo - Combinações de Ações

Somando estas forças as cargas horizontais remanescentes, as cargas horizontais de projeto são obtidas para a combinação 1, como:

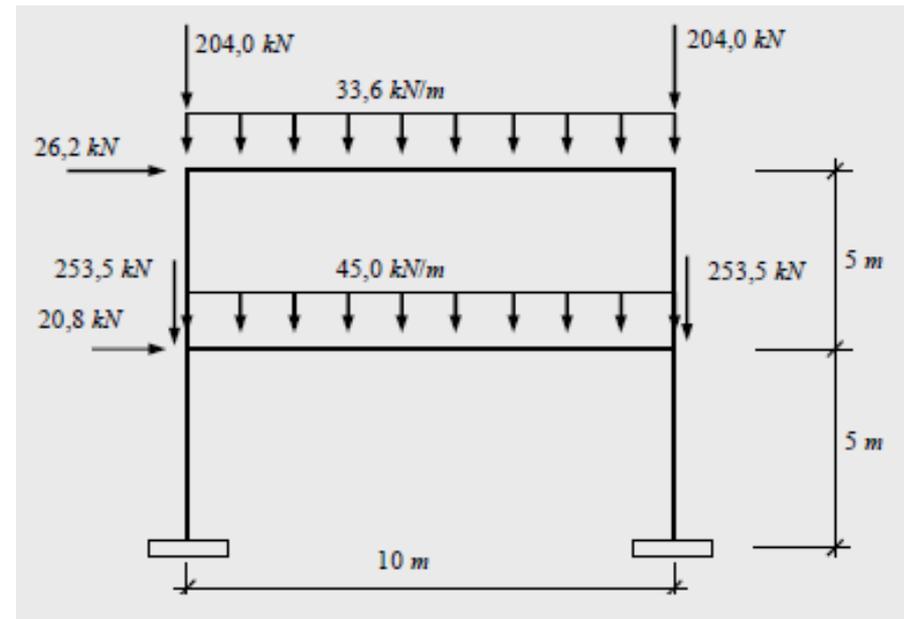
$$F_{H1,comb1} = 1,50 \times 0,6 \times 20 + 2,8 = 20,8 \text{ kN} .$$

$$F_{H2,comb1} = 1,50 \times 0,6 \times 26,7 + 2,2 = 26,2 \text{ kN} .$$

com majoração das cargas



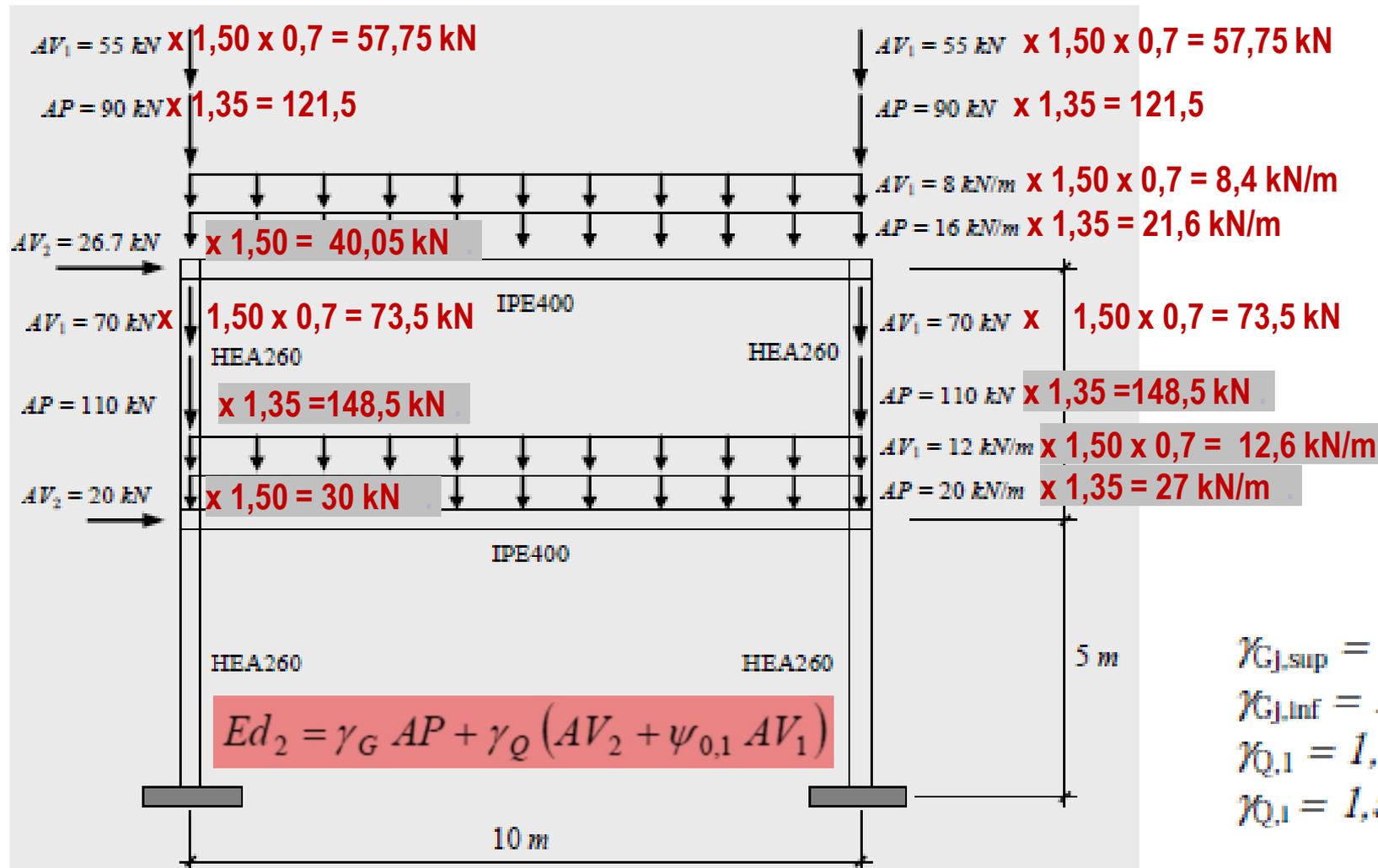
com majoração das cargas + imperfeições

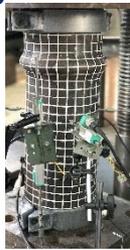




10. Exemplo - Combinações de Ações

Combinação 2 - carga permanente mais AV_2 como ação variável principal





10. Exemplo - Combinações de Ações

Usando o mesmo procedimento para a combinação 2, carga vertical de projeto aplicada no 1º pavimento, é:

$$1,35 \times (20 \times 10 + 2 \times 110) + 1,5 \times 0,7 \times (12 \times 10 + 2 \times 70) = 840,0 \text{ kN} ,$$

$$\text{logo, } F_{i1,comb 2} = 0,0029 \times 840,0 = 2,4 \text{ kN} .$$

A carga vertical de projeto aplicada no 2º pavimento, é:

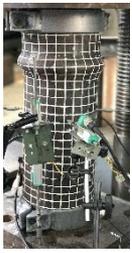
$$1,35 \times (16 \times 10 + 2 \times 90) + 1,5 \times 0,7 \times (8 \times 10 + 2 \times 55) = 658,5 \text{ kN} ,$$

$$\text{logo, } F_{i2,comb 2} = 0,0029 \times 658,5 = 1,9 \text{ kN} .$$

Somando estas forças as cargas horizontais remanescentes, as cargas horizontais de projeto são obtidas para a combinação 2, como:

$$F_{H1,comb 2} = 1,50 \times 20 + 2,4 = 32,4 \text{ kN} .$$

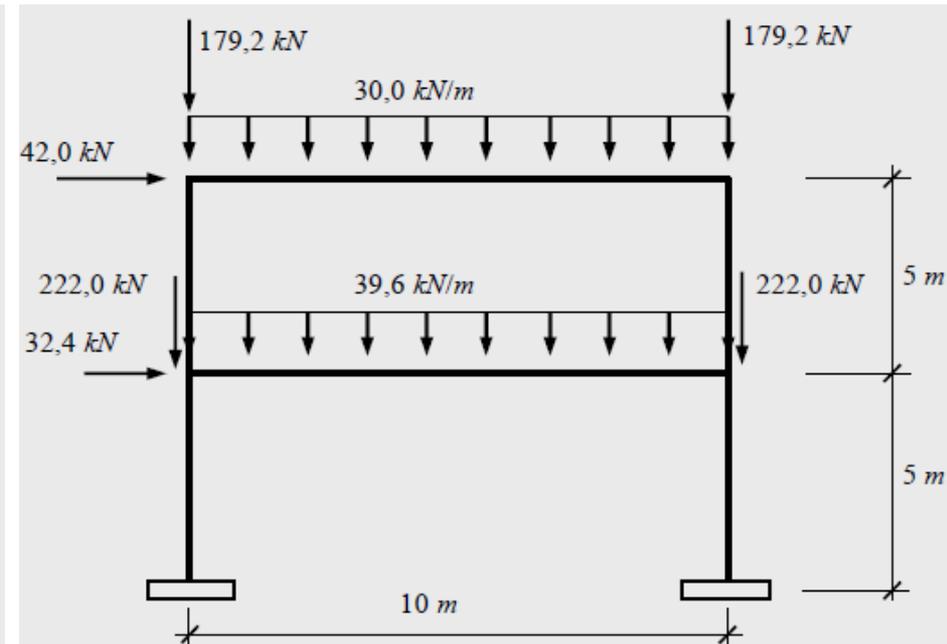
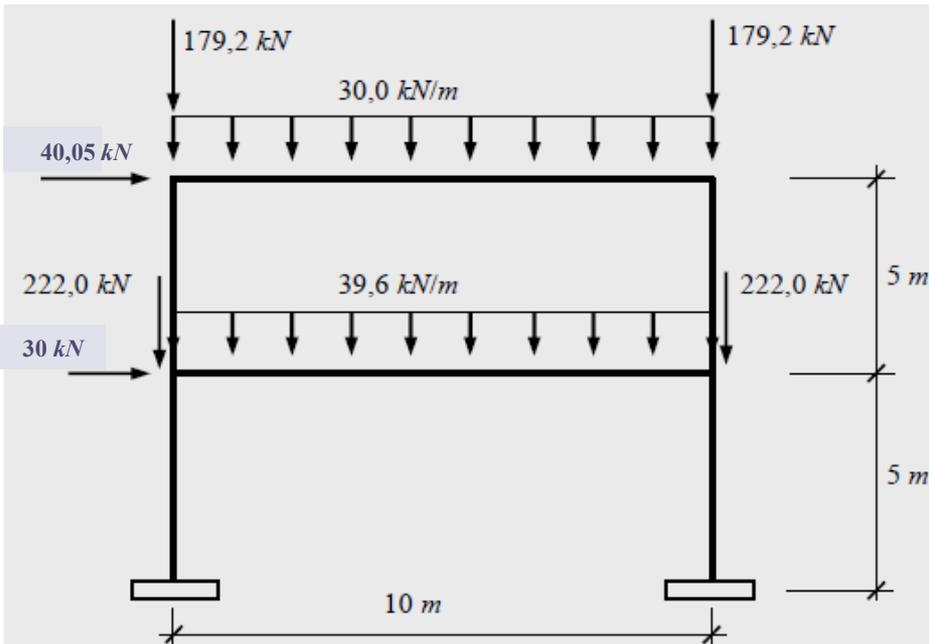
$$F_{H2,comb 2} = 1,50 \times 26,7 + 1,9 = 42,0 \text{ kN} .$$

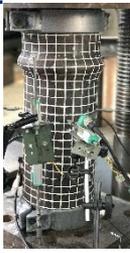


10. Exemplo - Combinações de Ações

com majoração das cargas

com majoração das cargas + imperfeições





11. Bibliografia

