

A smiling man with dark hair, wearing a black polo shirt with a small red logo on the chest, is pointing his right index finger towards the text. The background is a dark teal color with a radial pattern of thin lines emanating from the center.

WORKSHOP

ESTABILIDADE GLOBAL APLICADA

Estabilidade Global Aplicada

O que é Estabilidade Global?

A verificação da estabilidade global é um requisito de grande importância na elaboração do projeto estrutural de um edifício de Concreto Armado ou Protendido.

O atendimento a Estabilidade Global visa garantir a segurança da estrutura no Estado Limite Último, de forma não haja instabilidade na Estrutura completa quando submetida a todas as possíveis combinações

WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL
APLICADA**

Estabilidade Global Aplicada

O que é a Estabilidade Global?

- Na análise da estabilidade da estrutura deve-se levar em consideração:
 - Efeitos locais -> equilíbrio de cada elemento isolado;
 - Efeitos globais -> estrutura trabalhando em conjunto;
- Esforços de 1ª ordem -> equilíbrio da estrutura analisado na sua geometria inicial;
- Esforços de 2ª ordem -> equilíbrio na condição deformada;
- Não linearidade da estrutura;
- Parâmetros para análise dos efeitos de 2ª ordem (α , γ_z , $P\Delta$);
- Resultados mais realistas.

A estabilidade está associada ao equilíbrio da estrutura como um todo frente à possibilidade de deslocamentos que apresentariam uma sucessão cuja divergência caracterizaria uma instabilidade. Existem métodos e parâmetros para mensurar e avaliar o grau de estabilidade da estrutura.

WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL
APLICADA**

Análise Linear X Análise Não Linear

O estudo da estabilidade global das estruturas, perante o estado limite último, deve considerar a não linearidade física e geométrica do concreto armado, já que a perda do caráter estável está ligada às deformações sofridas.

Análise Linear

Quando o comportamento de um material obedece à Lei de Hooke, ou seja quando a deformação é proporcional à tensão, ele é dito como linear.

Relação tensão-deformação linear



Módulo Elasticidade (E_c) constante

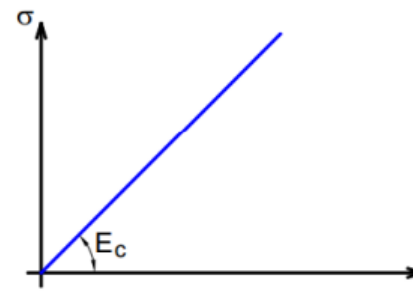


Diagrama tensão-deformação linear

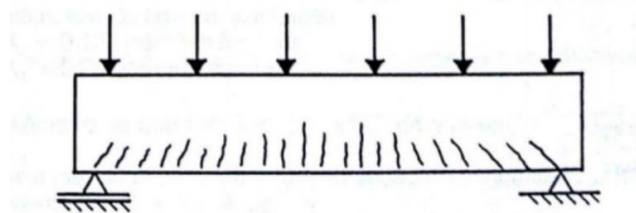
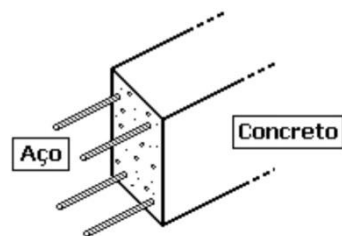
Análise Linear X Análise Não Linear

Análise Não Linear

A análise não linear de uma estrutura se dá através do comportamento não linear da mesma, onde a resposta da estrutura não é proporcional à medida que os carregamentos são aplicados.

O concreto armado é material essencialmente não linear, devido às seguintes características:

- Sua composição heterogênea (concreto e aço);
- Fissuração.



Fissuração típica em viga solicitada à flexão

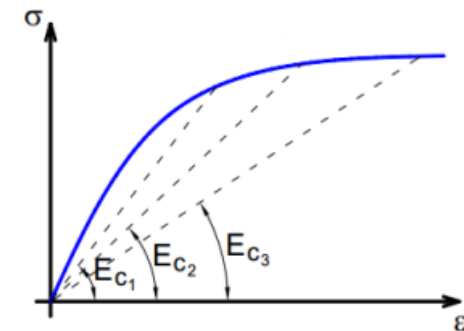


Diagrama tensão-deformação não linear

Não Linearidade Física X Não Linearidade Geométrica

O estudo da estabilidade global das estruturas, no Estado Limite Último, deve considerar a não linearidade física (NLF) e geométrica (NLG) do concreto armado.

Não linearidade Física: Decorre do fato do material não apresentar uma relação tensão-deformação linear (não segue a lei de Hooke), isto é, o comportamento do material não é elástico linear.

- fissuração
 - fluência
 - retração
- } Tais fenômenos não alteram a rigidez da Estrutura

Utiliza-se a relação momento-curvatura para obter diretamente o valor da rigidez EI , que é utilizada na análise estrutural.

Não Linearidade Física X Não Linearidade Geométrica

- **Não linearidade física**

A consideração da NLF de um pavimento em concreto armado busca efetuar uma análise mais precisa do desempenho em serviço da estrutura, através do tratamento mais refinado e realista do material. A principal verificação realizada consiste no atendimento ao ELS-DE (Deformação Excessiva). Para este estado limite, entre outras, temos duas verificações principais:

- Verificação das flechas sob as alvenarias após a sua construção;
- Verificação da flechas final total.

Não Linearidade Física X Não Linearidade Geométrica

- **Não linearidade física aproximada**

Para o estudo da estabilidade global, a NBR 6118 adota os seguintes valores de rigidez dos elementos estruturais:

Lajes: $(EI)_{sec} = 30\% \times E_{ci} \times I_c$

Vigas: $(EI)_{sec} = 40\% \times E_{ci} \times I_c$, para $A's \neq A_s$

$(EI)_{sec} = 50\% \times E_{ci} \times I_c$, para $A's = A_s$

Pilares: $(EI)_{sec} = 80\% \times E_{ci} \times I_c$

Onde:

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto;

E_{ci} é o módulo de elasticidade tangente inicial do concreto.

Quando a estrutura de contraventamento for composta exclusivamente por vigas e pilares, permite-se calcular a rigidez das vigas e pilares por:

$(EI)_{sec} = 70\% \times E_{ci} \times I_c$

Ou seja, no caso do modelo de pórtico formado somente por vigas e pilares, cabe ao engenheiro analisar qual configuração de rigidezes fica mais compatível.

Saiu da NBR 6118
Na Revisão de 2014

Não Linearidade Física X Não Linearidade Geométrica

- **Não linearidade física Refinada**

Sabe-se que a rigidez à flexão de um certo elemento é associada à tangente do gráfico Momento x Curvatura. Quando a relação entre os Momentos e a Curvatura é linear podemos associar à uma única rigidez associada:

$$EI = \frac{M}{\rho}$$

Porém, como para o concreto armado esta relação não é linear, é necessário construir os gráficos **Momentos x Curvaturas** para cada seção, considerando as armaduras, fissuração no concreto e esforço normal. Através das relações constitutivas dos materiais variam-se os níveis de deformação utilizando as deformadas de ruptura. Fixa-se o esforço normal (Nd) e obtém-se os momentos (Md) para cada deformada para a seção atender às equações de equilíbrio.

Sendo assim não adotam-se os valores aproximados de rigidezes, mas sim valores obtidos desta forma, com tratamento refinado.

Não Linearidade Física X Não Linearidade Geométrica

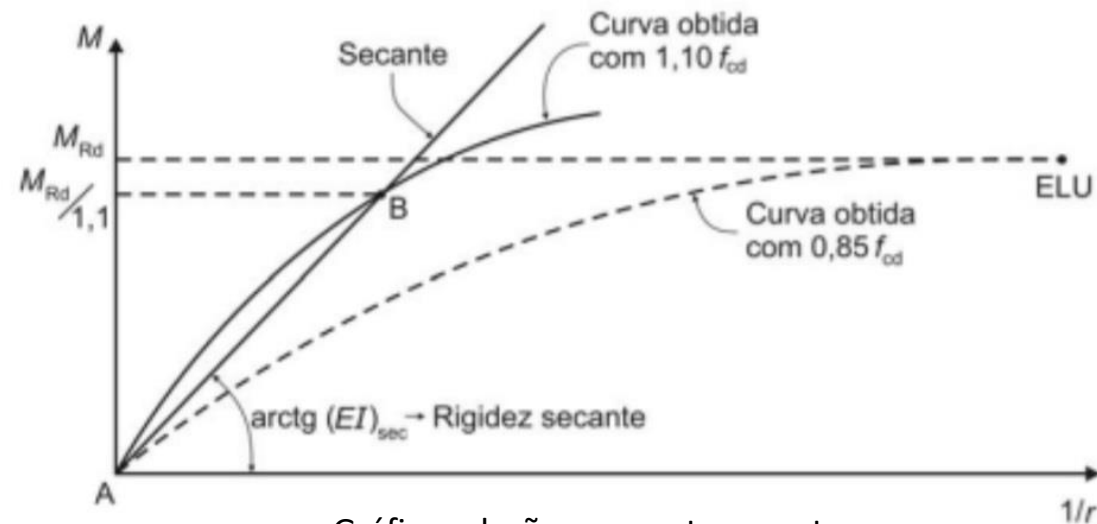


Gráfico relação momento-curvatura

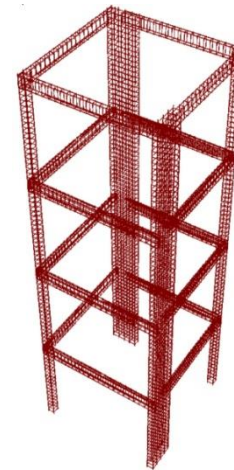
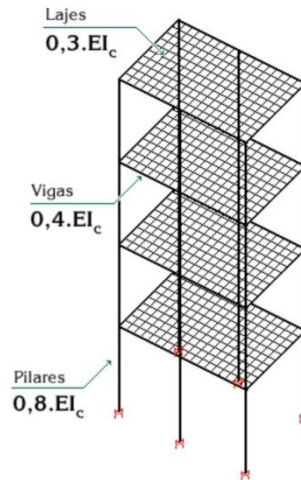
A curva cheia AB, que a favor da segurança, pode ser linearizada pela reta AB, é utilizada no cálculo das deformações;

A curva tracejada, obtida com os valores de cálculo das resistências do concreto e do aço, é utilizada somente para definir os esforços resistentes M_{rd} e N_{rd} (ponto máximo);

A reta AB é caracterizada pela rigidez secante $(EI)_{sec}$, que pode ser utilizada em processos aproximados para flexão composta normal ou oblíqua.

Não linearidade física aproximada x Não linearidade física Refinada

- Seguindo os padrões, a análise mais refinada tende a ser um modelo mais representativo para a estrutura. Porém, sua análise apresenta-se extremamente peculiar e complexa, repercutindo em todos os processos do projeto;
- Como hoje em praticamente todos os sistemas computacionais há a consideração da laje no pórtico completo e integrado, o número de nós e elementos se apresenta muito superior a um pórtico de vigas e pilares, ficando assim muito mais consistente do que o pórtico de vigas com NLF refinada.



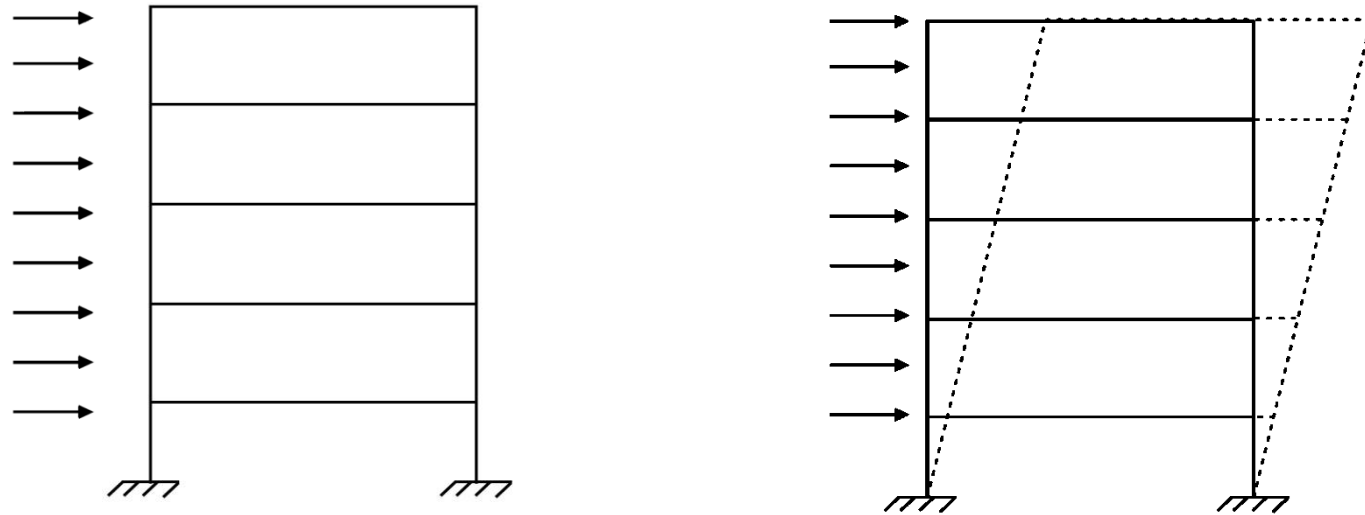
WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL
APLICADA**

Não Linearidade Física X Não Linearidade Geométrica

Não linearidade Geométrica:

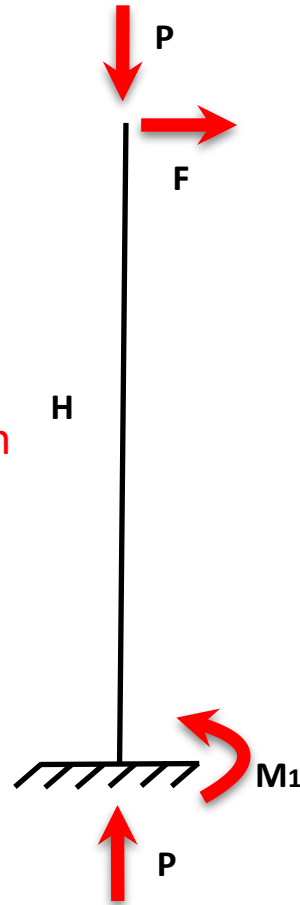
Está relacionada com as mudanças que possam ocorrer na geometria dos elementos estruturais.



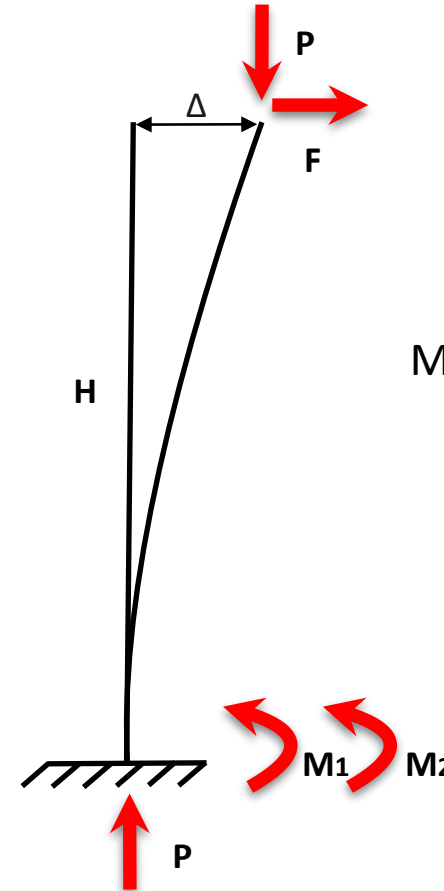
- **Não linearidade geométrica refinada:** consideram-se os sucessivos deslocamentos da estrutura causados pelos efeitos de 2ª ordem até a situação de equilíbrio da estrutura. O principal método utilizado é o P-delta.
- **Não linearidade geométrica aproximada:** entre os métodos aproximados destaca-se o γ_z .

Análise de 1ª ordem X Análise de 2ª ordem

$M_1 = F \cdot H$
Momento de 1ª ordem

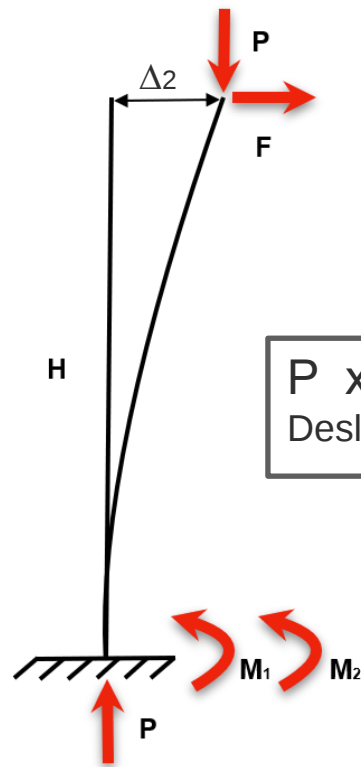


$M_{\text{final}} = M_1 + M_2 = F \cdot H + P \cdot \Delta$
Momento de 2ª ordem

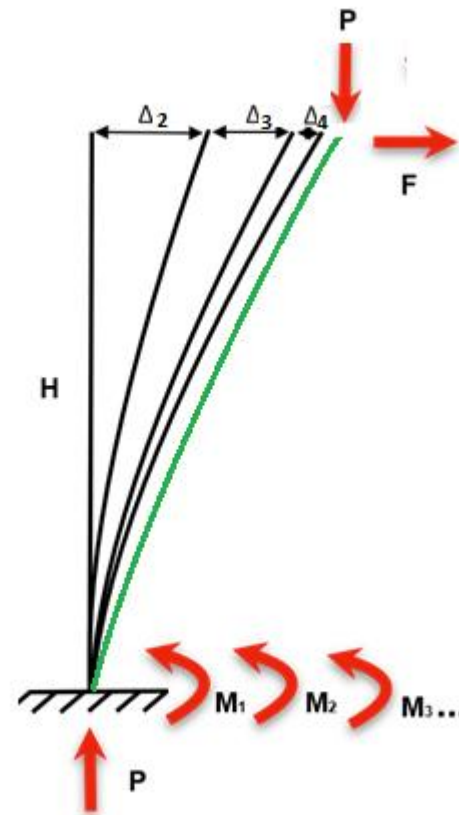


WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL
APLICADA**



$P \times \Delta_2$ gera novos
Deslocamentos!



$$M_1 + M_2 = F \cdot H + P \cdot \Delta_2$$

$$M_{\text{TOTAL}} = M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_n$$

WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL
APLICADA**

Estrutura de contraventamento

Edifícios solicitados a ações laterais devem apresentar uma estrutura capaz de garantir a estabilidade e capacidade resistente.

A capacidade resistente refere-se aos esforços oriundos das ações laterais. Assim, a estrutura deve ser dimensionada para combinações que envolvem estas solicitações.

- **Elementos de contraventamento:** elementos projetados para resistir às ações laterais
- **Elementos contraventados:** demais elementos, dimensionados apenas para resistir às ações verticais.

O engenheiro deve avaliar as condições de contorno para definir a estrutura de contraventamento. Para isso analisa-se a estrutura na sua configuração deformada para avaliar os efeitos de 1ª e 2ª ordem e classificar as ligações dos elementos como nós fixos ou nós móveis e a partir daí define-se a estrutura de contraventamento a ser utilizada.

Estrutura de contraventamento

⇒ Classificação da estrutura quanto à deslocabilidade:

- **Nós fixos:**

Os esforços de segunda ordem globais são **inferiores a 10%** dos esforços de primeira ordem.

Neste caso podemos desconsiderar os esforços de segunda ordem;

Análise das estruturas de nós fixos:

O cálculo pode ser realizado considerando cada elemento comprimido isoladamente, como barra vinculada nas extremidades aos demais elementos estruturais que ali concorrem, onde se aplica os esforços obtidos pela análise da estrutura efetuada segundo a teoria de 1ª ordem.

Sob a ação de forças horizontais, a estrutura é **sempre calculada como deslocável**. O fato de a estrutura ser classificada como sendo de nós fixos dispensa apenas a consideração dos esforços globais de 2ª ordem.

WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL
APLICADA**

Estrutura de contraventamento

⇒ Classificação da estrutura quanto à deslocabilidade:

- **Nós móveis:**

Os esforços de segunda ordem **superiores a 10%**, sendo preciso levar em consideração os esforços de segunda ordem.

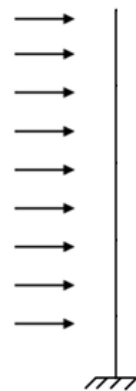
Análise das estruturas de nós fixos:

Devem ser obrigatoriamente considerados os efeitos da não-linearidade geométrica e da não-linearidade física e, portanto no dimensionamento devem ser obrigatoriamente considerados os efeitos globais e locais de 2ª ordem.

Estrutura de contraventamento

➤ Núcleo Rígido

- Modelo mais simples adotado para a estrutura de contraventamento;
- Adota-se um único elemento vertical engastado na fundação;
- Geralmente possuem elevada rigidez, composto por uma associação de lâminas verticais, sendo caixas de escadas e/ou elevadores;
- Todos os demais elementos contraventados.



WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL**
APLICADA

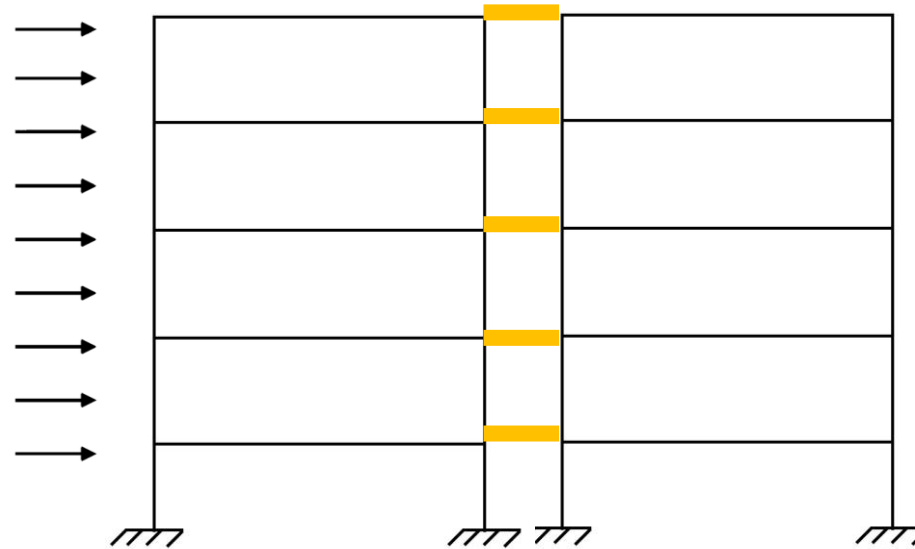
Estrutura de contraventamento

➤ Associação de Pórticos Planos

- Os pórticos planos formados por vigas e pilares são definidos separadamente;
- Necessário considerar o funcionamento conjunto entre pórticos para possibilitar o dimensionamento e avaliação adequada da rigidez;
- Para transformar a estrutura tridimensional em bidimensional associam-se os pórticos planos introduzindo-se um elemento de ligação. Este elemento deve possuir uma elevada rigidez axial e uma baixa rigidez à flexão. Desta forma, compatibilizam-se os deslocamentos em cada nível estrutural, possibilitando uma distribuição de esforços e obtenção de deslocamentos compatíveis com a estrutura espacial.
- Assim é possível associar os núcleos rígidos com os pórticos planos.

Estrutura de contraventamento

➤ Associação de Pórticos Planos



— Elemento com elevada Rigidez axial e rigidez a flexão desprezível

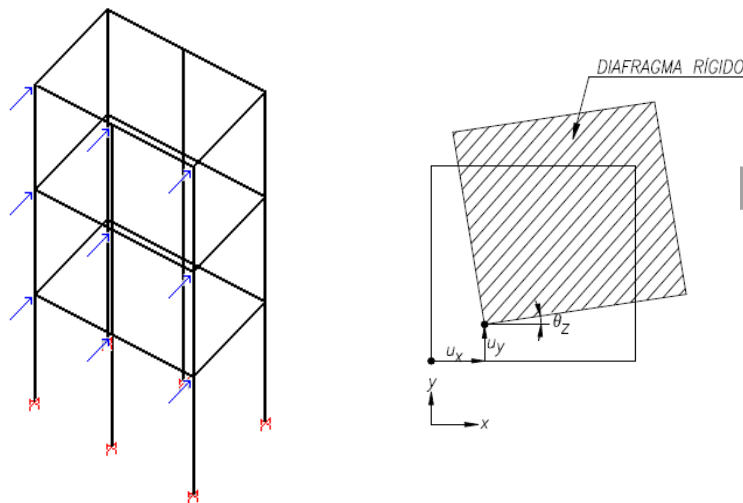
WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL**
APLICADA

Estrutura de contraventamento

➤ Pórtico Espacial de Vigas e Pilares

- Evolução do pórtico plano
- 6 graus de liberdade por nó
- É possível considerar em um único modelo todas as cargas verticais e horizontais, obtendo-se os esforços através da compatibilidade de deslocamentos de toda estrutura reticulada (vigas e pilares).



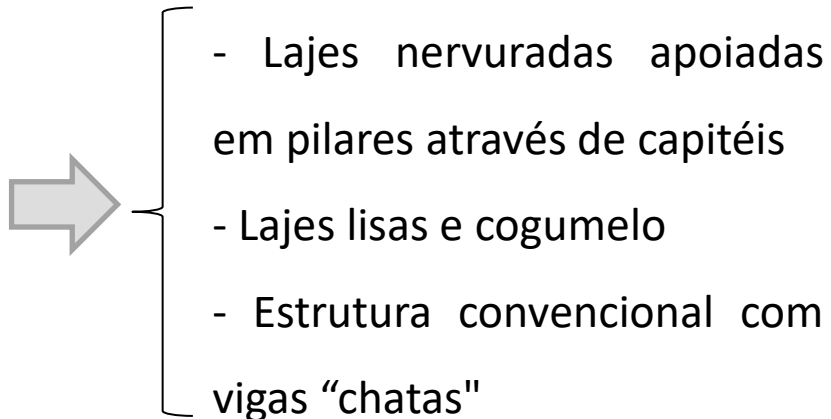
Para simular o efeito do diafragma rígido proporcionado pelas lajes, utiliza-se alguns artifícios, introduzindo elementos e alterando determinadas características de outros. Porém, em alguns casos estas intervenções apresentam limitações.

WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL
APLICADA**

Estrutura de contraventamento

➤ Pórtico Espacial de Pilares, Vigas e Lajes

- Com a inclusão da laje no modelo, a análise estrutural é realizada efetuando-se a compatibilização de deslocamentos entre todos os elementos estruturais;
 - Fundamental quando a rigidez da laje e de suas ligações for significativa frente a outros mecanismos de contraventamento da estrutura;
 - A laje pode ser representada por elementos de superfície (casca ou placa) e barra.
- 

Estrutura de contraventamento

➤ Pórtico Espacial de Pilares, Vigas e Lajes

Vantagens do Pórtico Completo

- ✓ Modelo mais representativo ;
- ✓ Possibilidade de avaliação precisa da rigidez e da massa na estrutura completa para análise dinâmica ;
- ✓ Melhor quantificação e redução dos efeitos de 2ª ordem ;
- ✓ Efeito diafragma rígido adequadamente representado pelos próprios elementos do pavimento ;
- ✓ Distribuição de esforços mais realistas nos elementos estruturais ;
- ✓ Validação da estabilidade global para estruturas equivocadamente invalidadas por modelos simplificados.

Parâmetro de instabilidade α

- Avaliação da sensibilidade da estrutura aos efeitos de segunda ordem;
- Classifica a estrutura em nós fixos ou nós móveis;
- Apenas para estruturas simétricas;
- Em edificações com menos de 4 pavimentos.

$$\alpha = H_{tot} \sqrt{\frac{N_k}{E_{cs} I_c}}$$

Sendo:

N_k : cargas verticais atuantes (valor característico)

H : altura da edificação;

$E_{cs} I_c$: somatório dos valores de rigidez de todos os pilares na direção considerada.

Onde:

$\alpha_1 = 0,2 + 0,1n$, se $n \leq 3$ pavimentos

$\alpha_2 = 0,6$, se $n \geq 4$ pavimentos

Portanto:

Se $\alpha < \alpha_1$: estrutura de nós fixos;

Se não: estrutura de nós móveis.

Gama-Z (γ_z)

- Categoriza a estrutura em nós móveis ou fixos, partindo de uma análise de 1ª ordem da edificação
- Estima com certa precisão os esforços de 2ª ordem;
- Estruturas reticuladas de no mínimo 4 pavimentos;
- $\gamma_z \leq 1,1$: Estrutura de nós fixos. Os esforços globais de 2ª ordem podem ser dispensados;
- $1,1 < \gamma_z < 1,3$: Estrutura de nós móveis, sendo obrigatória a consideração dos efeitos de 2ª ordem.
- Dentro do intervalo de 1,1 a 1,3 a NBR 6118 permite calcular os esforços de 2ª ordem majorando-se as ações horizontais em 0,95. γ_z .

Gama-Z (γ_z)

$$\gamma_z = \frac{1}{1 - \frac{\Delta M_{tot,d}}{M_{1tot,d}}}$$

Onde:

$\Delta M_{tot,d}$ é a soma dos produtos de todas as forças verticais atuantes na estrutura, com seus valores de cálculo, pelos deslocamentos horizontais de seus respectivos pontos de aplicação, obtidos da análise de 1ª ordem;

$M_{1tot,d}$ é o momento de tombamento, ou seja, a soma dos momentos de todas as forças horizontais, com seus valores de cálculo, em relação à base da estrutura.

Gama-Z (γ_z)

Formulação de segurança

Pode ser levada em conta a formulação de segurança definida na NBR 6118, com $\gamma_{f3} = 1,1$.

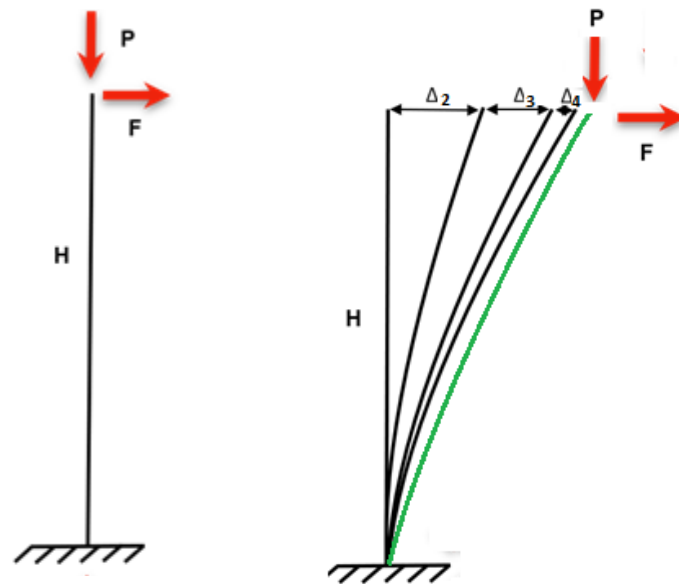
O objetivo dessa consideração é dar suprimento à análise de 2ª ordem, o fator de segurança que trata das aproximações de projeto (γ_{f3}), de tal forma que os efeitos de 2ª ordem calculados com valores de cálculo fiquem ligeiramente menores que a análise efetuada com a aplicação direta de $\gamma_f = 1,4$ (que superestimam os efeitos de 2ª ordem), não podendo esquecer, de complementá-los com f_3 na obtenção do resultado final.

Isso afeta ligeiramente a fórmula de cálculo do coeficiente GamaZ:

Obs: Para $\gamma_{f3} = 1,1$, o coeficiente GamaZ é menor que o valor obtido com $\gamma_{f3} = 1,0$. Cabe ao engenheiro definir o valor a ser adotado durante o processamento.

Efeito $P\Delta$

- Recomendada quando o coeficiente γ_z ultrapassar o valor de 1,1;
- Também avaliará os efeitos de 2ª ordem:



Estrutura
indeformada

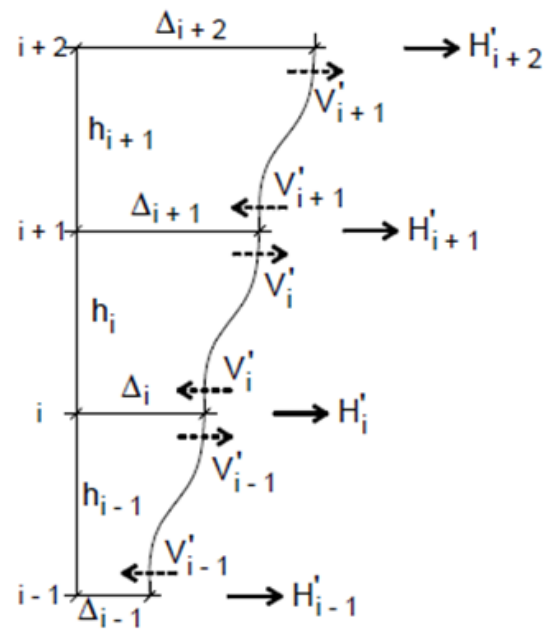
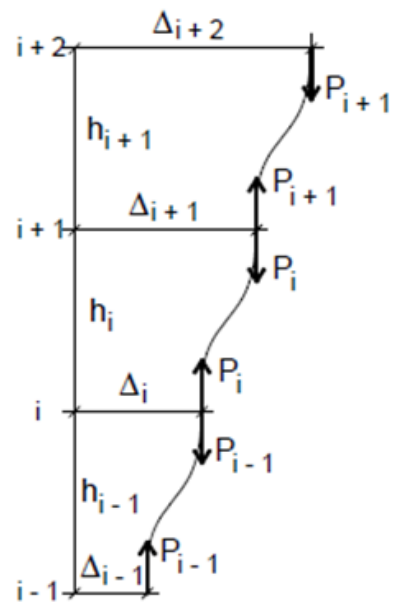
Estrutura deformada –
Efeito $P\Delta$

WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL
APLICADA**

Método Iterativo

Primeiramente é realizada uma análise de primeira ordem com as cargas horizontais. Os deslocamentos horizontais calculados são usados conjuntamente com as cargas verticais para calcular, em cada nível, um incremento equivalente de cargas equivalentes horizontais às quais são adicionadas as cargas horizontais iniciais. O processo é repetido até que o incremento nos deslocamentos horizontais seja desprezível, ou seja, menor do que um valor pré-fixado.



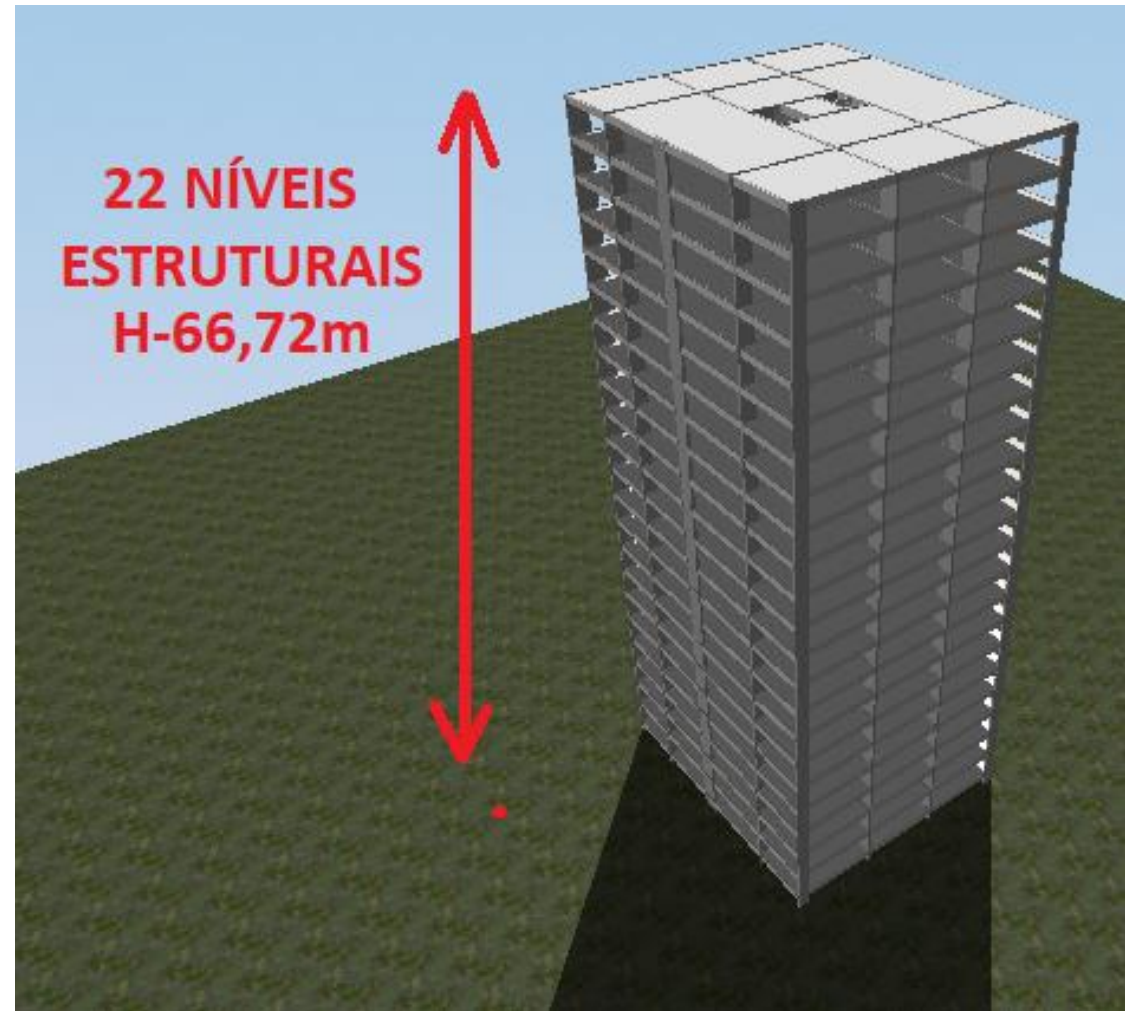
$$V'_i = \frac{\sum P_i}{h_i} \cdot (\Delta_{i+1} - \Delta_i)$$

$$H'_i = V'_{i-1} - V'_i$$

P_i – cargas verticais

H_i – horizontais fictícias

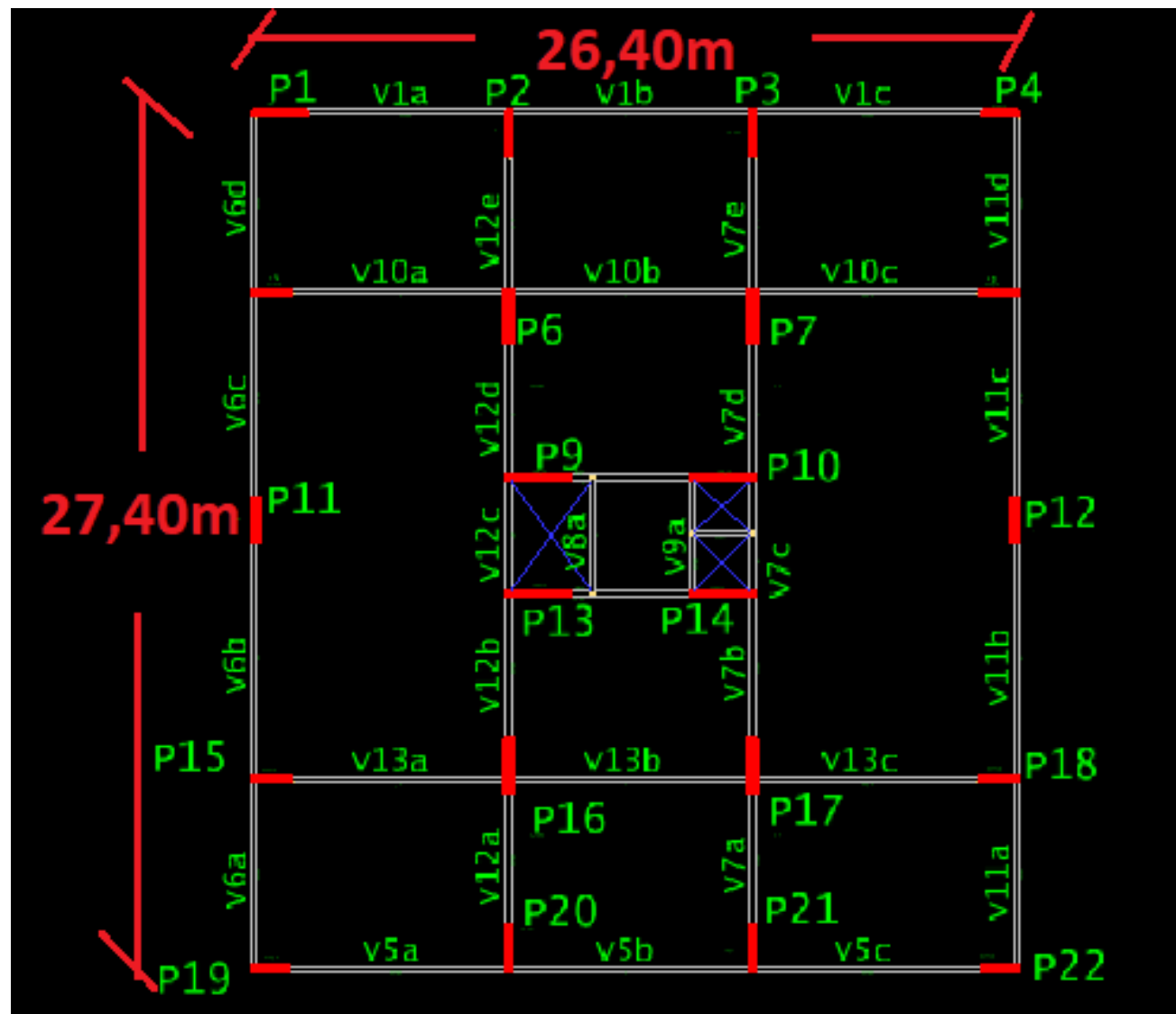
ESTUDO DE CASO



WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL**
APLICADA

DESENHO DE FORMA: PAVIMENTO TIPO



WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL**
APLICADA



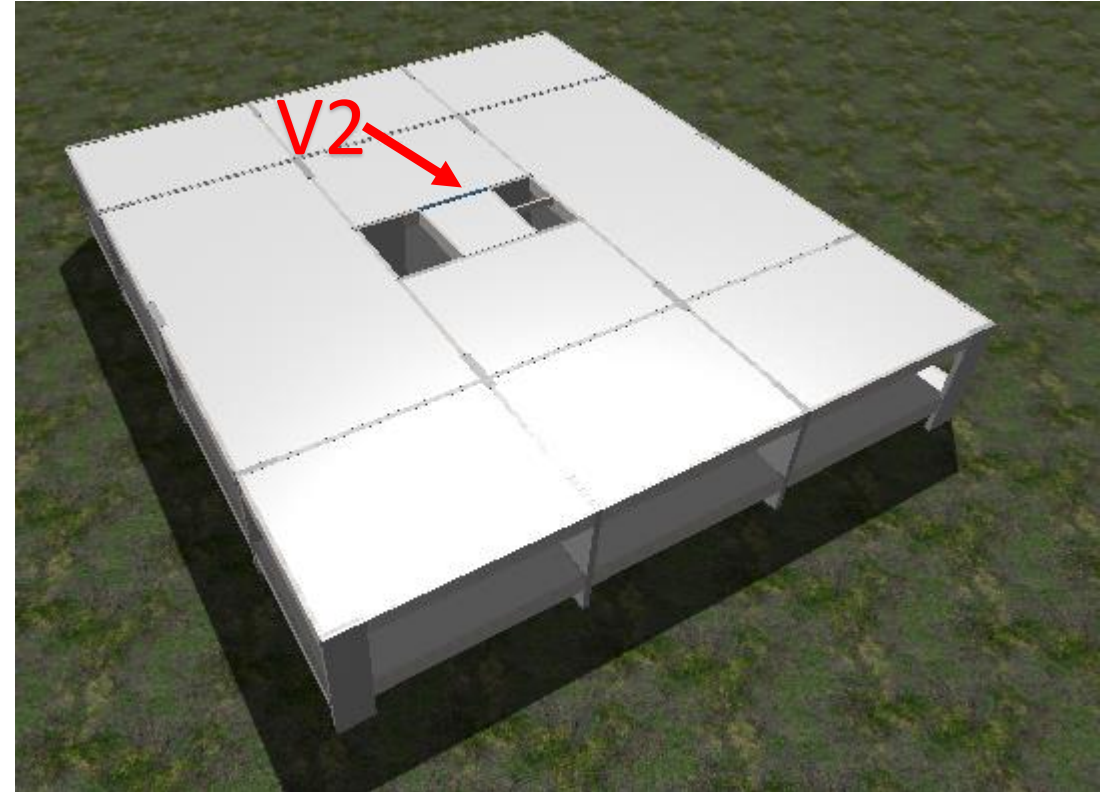
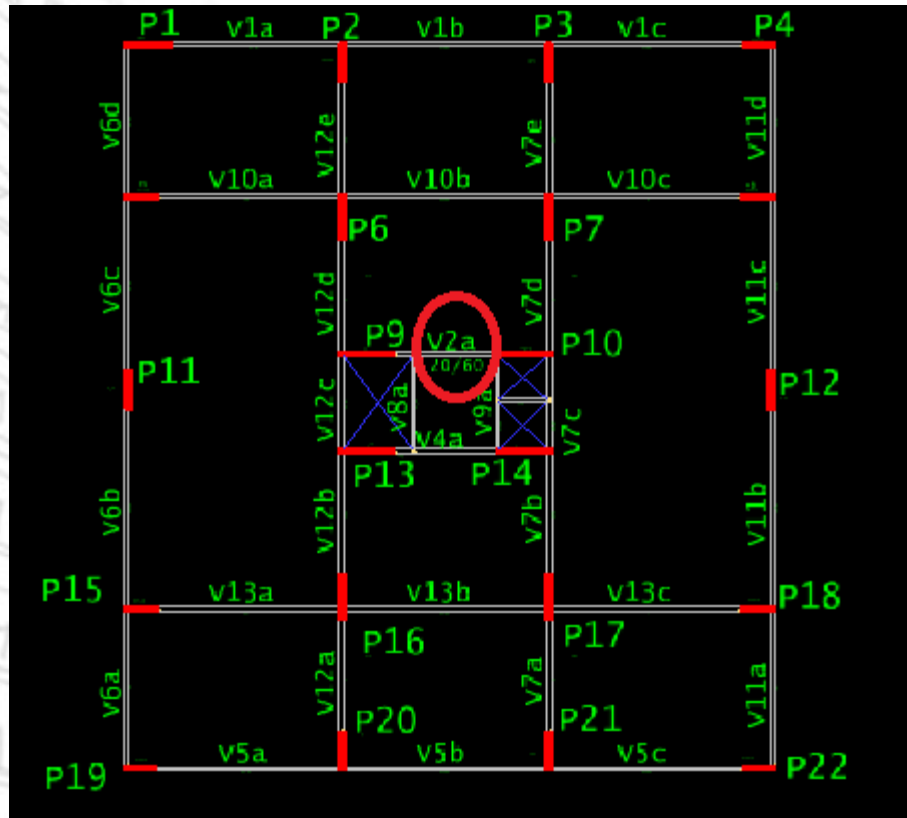
AVALIAÇÃO GERAL DA ESTABILIDADE GLOBAL

GAMA Z

WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL**
APLICADA

APLICAÇÃO NAS COMBINAÇÕES: V2-1oTETO



WORKSHOP

**ESTABILIDADE
GLOBAL**
APLICADA