

Treinamento Avançado Scaffolding

All information in this document is subject to modification without prior notice. No part of this manual may be reproduced, stored in a database or retrieval system or published, in any form or in any way, electronically, mechanically, by print, photo print, microfilm or any other means without prior written permission from the publisher. SCIA is not responsible for any direct or indirect damage because of imperfections in the documentation and/or the software.

© Copyright 2015 SCIA nv. All rights reserved.

Índice

Introdução	1
Modelo	2
Geral	2
Materiais:	3
Seções transversais	4
Montagem - linear	4
PRANCHAS	5
CONTRAVENTAMENTOS.....	5
LIGAÇÕES	5
Apoios	6
VERIFICAÇÃO FINAL DA MODELAGEM	7
Condições de carregamento e combinações de cargas	8
Geral	8
Tipos de cargas.....	8
Princípio de combinações	10
Condições de carregamentos pelo SCIA Engineer	10
Caso de carga 1: Peso Próprio	11
Caso de carga 2: Peso Próprio dos Rodapés (e de outros elementos estruturais)	11
Caso de carga 3: Carga de serviço do deck do piso principal.....	11
Caso de carga 4: Carga útil do Segundo Piso.....	11
Caso de carga 5: Carga de trabalho 25%.....	11
Caso de carga 6: Carga máxima do vento perpendicular à fachada.....	12
Caso de carga 7: Carga máxima de vento paralela à fachada.....	16
Caso de carga 8: Carga de trabalho do vento perpendicular à fachada	16
Caso de Carga 9: Carga de trabalho de vento paralela à fachada	17
Combinações Lineares de Carga	17
Combinação 1: Fora de serviço, vento perpendicular	17
Combinação 2: Fora de serviço, vento paralelo	17
Combinação 3: Em serviço, vento perpendicular	17
Combinação 4: Em serviço, vento paralelo	18
Coeficientes.....	18
Resultados	19
Verificação do ELS pela Norma de Aço EN 1993-1-1	20
Verificação ELS do Andaime – EN 12811-1-1	21
Verificação do ELU pela Norma de Aço – EN 1993-1-1	23
Verificação de Seção pelo SCIA Engineer	23
Verificação de Estabilidade	25
Dados de flambagem	25
Coeficiente de Flambagem	26
Verificação de Estabilidade pelo SCIA Engineer	27
Verificação do ELU do Andaime – EN 12811-1-1	29
Geral	29
Verificação do Andaime pelo SCIA Engineer	30
Combinações Não Lineares	31
Visão Geral	31
Alfa crítico	34
Imperfeição da estrutura global ϕ	34
Imperfeição inicial em arco e_0	36

Cálculo de segunda ordem	38
Timoshenko	38
Newton-Raphson	41
Estabilidade	43
Estabilidade Linear	43
Cálculo manual de K_G	45
Forma de Flambagem	46
Tipos de articulação e rigidez não linear	54
Andaime – Verificação de Ligação	62
Verificação Não Linear do Andaime	65
Alumínio – não incluído no pacote	67
Tipos de alumínio	67
Imperfeição local inicial e_0	69
Forma inicial	70
Verificação da seção	72
Documento	77
Modelo	78
Blocos do Usuário	79
Referências	81
Anexo A: Pressão do Vento versus Força do Vento	82

Introdução

Esse curso foi preparado para o pacote de andaimes do SCIA Engineer. Esse pacote inclui os seguintes módulos:

Módulo	Descrição
esa.00	Modelador de elementos 1D
esa.01	Modelador de elementos 2D planos
esa.06	Caixa de ferramentas de produtividade
esas.29	Gerador de cargas planas
esas.00	Análise estática linear 2D
esas.01	Análise estática linear 3D
esas.07	Elementos apenas de tensão
esas.08	Apoios apenas de pressão
esas.09	Molas e junções para vigas não lineares
esas.42	Molas de fricção
esas.10	Análise geométrica não linear
esas.13	Análise de estabilidade de barras
esasd.01.01	Verificação pela norma de aço - EN 1993
esasd.13.01	Verificação de andaimes - PrEN 12811-1
esadt.01	Visão geral dos desenhos do aço

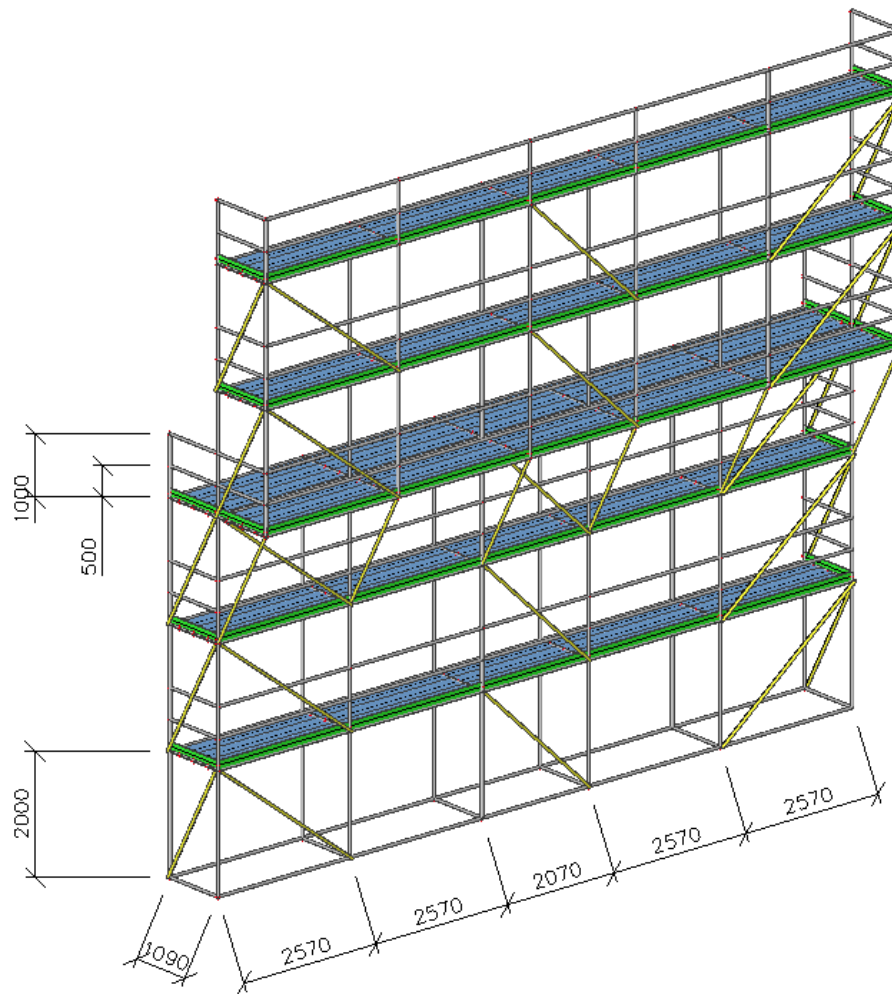
Se forem necessários outros módulos para a execução de uma ação específica descrita nesse manual, eles serão indicados.

Modelo

Geral

O objetivo desse manual é o de mostrar um modo de projetar um andaime (classe 3) utilizando o software SCIA Engineer. Esse manual apresenta a elaboração de um exemplo simples.

O seguinte andaime será abordado nesse curso:



Para o início do projeto os seguintes dados foram selecionados:

Estrutura XYZ
Nível de Projeto: Avançado
Material: S235
Norma: EC-EN

incluindo as seguintes funcionalidades:

Não linearidade, Andaime (+ todas as opções de não linearidade do lado direito da janela)

Materiais:

Para os materiais, o S235 geralmente é utilizado. No entanto, as pranchas serão inseridas como elementos estruturais. O peso médio dessas pranchas é diferente do peso do S235. Por esse motivo são inseridos materiais extras pelo SCIA Engineer, nos quais o peso será adaptado. Esse peso pode ser determinado da seguinte forma:

PRANCHAS

As pranchas de 19cm e 32cm foram consideradas separadamente. Para cada uma delas foi calculado um peso médio:

Nome	Peso [kg]	Peso [m]	[kg/m]	Média
Prancha de aço 32/307	23.2	3.07	7.56	8,20 kg/m
Prancha de aço 32/257	19	2.57	7.39	
Prancha de aço 32/207	15.7	2.07	7.58	
Prancha de aço 32/157	12.2	1.57	7.77	
Prancha de aço 32/140	10.8	1.4	7.71	
Prancha de aço 32/109	10.4	1.09	9.54	
Prancha de aço 32/73	7.2	0.73	9.86	
Prancha de aço 19/307	18.2	3.07	5.93	6,18 kg/m
Prancha de aço 19/257	15.5	2.57	6.03	
Prancha de aço 19/207	12.7	2.07	6.14	
Prancha de aço 19/157	10	1.57	6.37	
Prancha de aço 19/109	7	1.09	6.42	

Foi assumido que a espessura das pranchas seria de 4 cm. Os pesos das pranchas são:

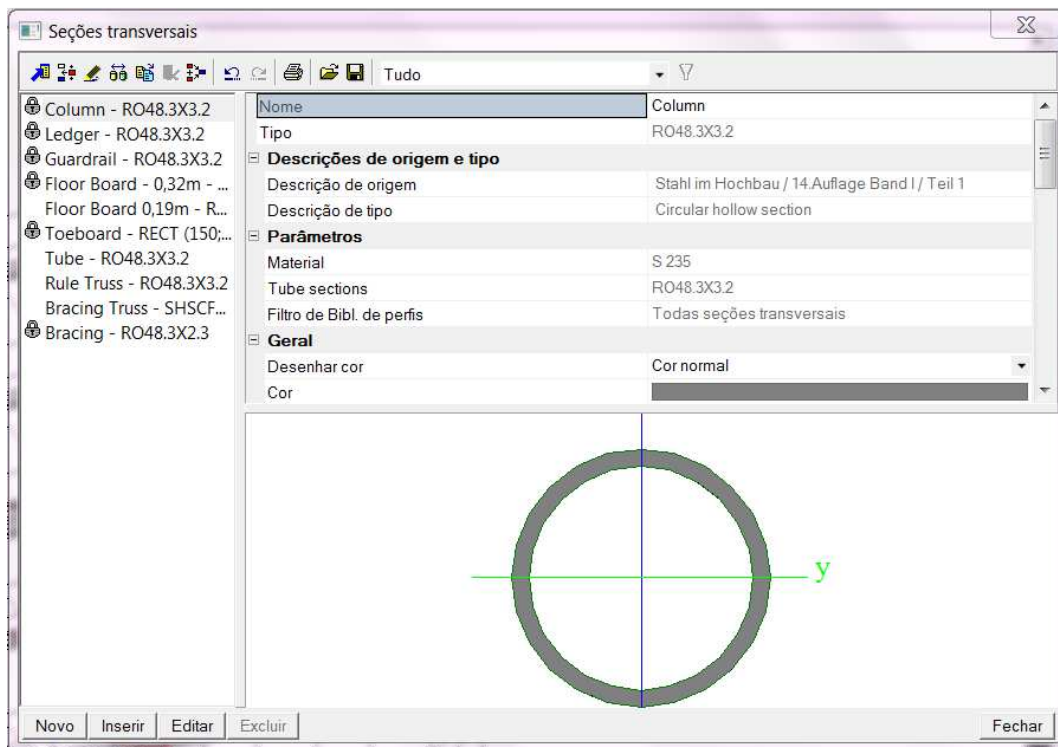
$$\Rightarrow \text{Pranchas de } 0,32 \text{ m: } \rho = \frac{8,2 \text{ kg/m}}{0,32 \text{ m} \times 0,04 \text{ m}} = 640,63 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow \text{Pranchas de } 0,19 \text{ m: } \rho = \frac{6,18 \text{ kg/m}}{0,19 \text{ m} \times 0,04 \text{ m}} = 813,16 \text{ kg/m}^3$$

Seções transversais

A tabela abaixo apresenta todas as seções transversais utilizadas no andaime:

	Seções transversais	Material
Coluna	RO48,3x3,2	S235
Travessa	RO48,3x3,2	S235
Gradil	RO48,3x3,2	S235
Contraventamento	RO48,3x2,3	S235
Pranchas de 0,32 m	RECT (40; 320)	VL 0,32
Pranchas de 0,19 m	RECT (40; 190)	VL 0,19
Tubo (corrimão)	RO48,3x3,2	S235
Treliça Plana	RO48,3x3,2	S235
Treliça de Contraventamento	SHSCF25/25/2,5	S235



Montagem - linear

A montagem será executada em Estrutura 3D para o primeiro nível. Depois disso, esse nível será copiado para as estruturas superiores. Os tipos de elementos considerados nessa estrutura são os seguintes:

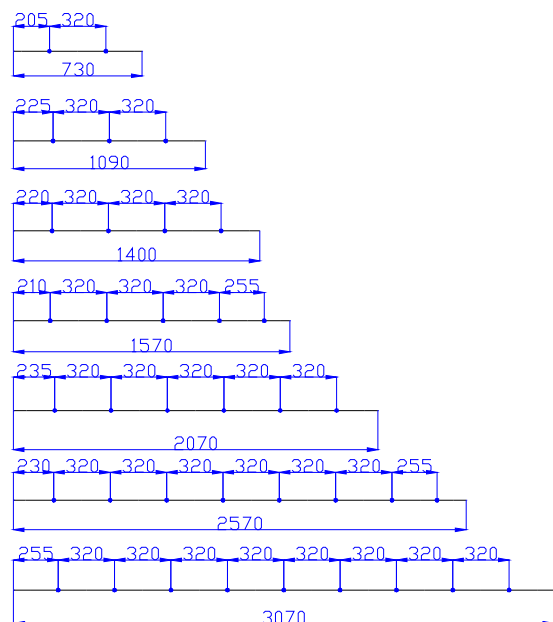
- Colunas: coluna
- Contraventamento: contraventamento vertical do vento
- Vigas
- Articulações
- Apoios

Observação:

Observe que o método descrito neste capítulo para inserir rigidez é simplificado. Para inserir essa rigidez corretamente, os respectivos dados precisam ser considerados e calculados com a funcionalidade de não linearidade. Isso será explicado mais detalhadamente nesse curso.

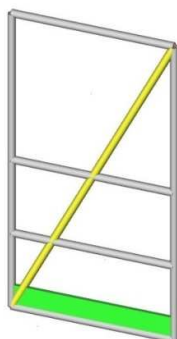
PRANCHAS

O cálculo dos elementos de prancha de piso depende do comprimento das vigas. A figura abaixo mostra todas as possibilidades. O comprimento total da travessa é mostrado na parte inferior. A distância dos pontos, onde a prancha precisa ser encaixada, é mostrada na parte superior.

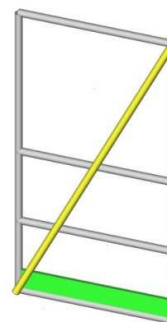


CONTRAVENTAMENTOS

Os contraventamentos são inseridos com uma excentricidade na direção y de 48,3 mm (largura do perfil): $e_y = \pm 48,3\text{mm}$. Dessa forma, os contraventamentos atuam sobre os outros elementos e não entre eles:



Sem excentricidade



Com excentricidade

LIGAÇÕES

Ligações Montante – Montante

O comprimento de sobreposição entre duas colunas é de 200 mm > 150 mm, e assim sendo as colunas adquirem rigidez na direção x.

Além disso, a margem entre duas colunas é de 3,9 mm ($=48,3\text{ mm} - 2 \times 3,2\text{ mm} - 38\text{ mm}$), que é menor do que 4 mm. Portanto, as ligações na direção y e z são rígidas.

De acordo com a norma, o seguinte é também aplicável:

- ⇒ De acordo com a norma EN12811-1, a ligação coluna – coluna pode ser considerada **rígida** no modelo
- ⇒ Articulações não serão utilizadas nas extremidades das barras verticais de apoio.

Ligações Montante – Travessa e Montante – Guarda corpo

- Direção y: 0,10 MNm/rad
- Direção z: 0,005 MNm/rad

Essas rigidezes são obtidas a partir dos dados do fornecedor. Nesse caso, a rigidez para a direção y é obtida do fornecedor e um valor menor é assumido para a direção z. Evidentemente que esse não é um método correto. Ambos deveriam ser obtidos a partir de dados do fornecedor.

Ligações Montante – Rodapé e Travessa – Prancha

- Direção y: Articulada
- Direção z: Rígida

Ligações Montante - Contraventamento

- Direção y: Articulada
- Direção z: Rígida

Resumo:

De forma resumida, as seguintes rigidezes podem ser consideradas pelo SCIA Engineer:

Montante-travessa:	direção y: 0,10 MNm/rad direção z: 0,005 MNm/rad
Montante-gradil:	direção y: 0,10 MNm/rad direção z: 0,005 MNm/rad
Montante-contraventamento:	direção y: Livre direção z: Rígida
Montante-rodapé:	direção y: Livre direção z: Rígida
Travessa-prancha:	direção y: Livre direção z: Rígida

Apoios

Há dois tipos de apoios: As placas de base na parte inferior e as ancoragens na parede.

Para as **placas de base**, as translações em todas as direções são fixas (**Translações X, Y e Z fixas**). Para as ancoragens, somente as translações correspondentes às direções x e y são fixas (**Translações X e Y fixas**).

As **ancoragens** são introduzidas de acordo com o esquema de ancoragem: A partir de 4 m de altura, **todos** os montantes devem ser ancorados para cima subsequentemente a cada 4 m. Acima de 20 m de altura essas ancoragens precisam ser executadas a cada 2 metros.

VERIFICAÇÃO FINAL DA MODELAGEM

*Após concluir a modelagem recomenda-se verificar os cálculos utilizando o comando “**Check Structure Data**” (verificar os dados da estrutura). Essa função permite verificar a geometria quanto a possíveis erros.*

Após a verificação, a opção ligar nós/bordas aos elementos deve ser aplicada em todo o modelo. Com essa função as diferentes partes são ligadas umas nas outras.

Condições de carregamento e combinações de cargas

Geral

Tipos de cargas

Há três tipos principais de cargas que devem ser considerados [EN12811-1, 6.2.1.]:

- Cargas permanentes: Estas cargas devem incluir o peso próprio da estrutura do andaime, incluindo todos os componentes, tais como plataformas, guarda corpo e outras estruturas protetoras e quaisquer estruturas auxiliares tais como torres de içamento.
- Cargas variáveis: Essas cargas devem incluir as cargas de serviço (carregamento na área de trabalho, cargas nas proteções laterais) e, se for o caso, cargas de vento, neve e gelo.
- Cargas acidentais

As cargas **permanentes** são inseridas assim como o peso próprio no SCIA Engineer.

A única carga **acidental** especificada nas Normas Europeias seria a carga da proteção lateral [mais informações no EN12811-1, 6.2.5.1].

As **cargas variáveis** podem ser consideradas como cargas de trabalho e cargas de vento

As **cargas de serviço** são apresentadas na Tabela 3 da EN 12811-1:

Table 3 — Service loads on working areas (see also 6.2.2)

Categoria de carga	Carga uniformemente distribuída q_1 kN/m ²	Carga concentrada em uma área F_1 kN	Carga concentrada em uma área F_2 kN	Carga parcial na área	
				q_2 kN/m ²	Partial area factor a_p ¹
1	0,75 ²	1,50	1,00	---	---
2	1,50	1,50	1,00	---	---
3	2,00	1,50	1,00	---	---
4	3,00	3,00	1,00	5,00	0,4
5	4,50	3,00	1,00	7,50	0,4
6	6,00	3,00	1,00	10,00	0,5

Cada uma das áreas é capaz de suportar as diversas cargas q_1 , F_1 e F_2 , individualmente, mas não acumulativamente.

q_1 : Carga de serviço uniformemente distribuída (EN12811-1, 6.2.2.2)

Cada área de trabalho é capaz de suportar as cargas uniformemente distribuídas, q_1 , conforme definidas na tabela acima.

F_1 e F_2 : Carga concentrada (EN12811-1, 6.2.2.3)

Cada uma das unidades da plataforma é capaz de suportar as cargas F_1 uniformemente distribuídas na área de 500mm x 500mm, mas não simultaneamente com a carga F_2 uniformemente distribuída por uma área de 200mm x 200mm.

A posição de cada carga é selecionada para causar o efeito mais desfavorável.

Quando uma unidade de plataforma for menor que 500mm, a carga poderá ser reduzida para essa unidade proporcionalmente a largura da plataforma, no entanto, em nenhum caso a carga deverá ser reduzida para menos de 1,5kN.

q₂: Carga parcial na área (EN12811-1, 6.2.2.4)

Essa carga deve ser aplicada somente para as categorias 4, 5 e 6. Nos casos em que cada plataforma seja capaz de suportar uma área de carregamento parcial q_2 em uma área A_{q2} :

$$A_{q2} = l \cdot w \cdot a_p$$

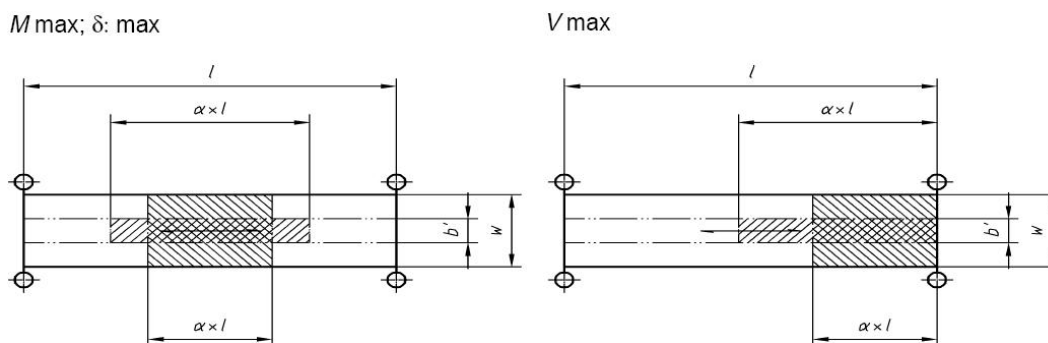
Onde:

l O comprimento

w A largura

a_p Coeficiente da Tabela 3

As dimensões e posição da área parcial são escolhidas para que causem o efeito mais desfavorável. Um exemplo é apresentado abaixo:



$$b' \leq a_p \times w: \quad \alpha = 1$$

$$a_p \times w \leq b' \leq w: \quad \alpha = a_p \times \frac{w}{b'}$$

Carga de vento

De acordo com o item 6.2.7.4 da EN12811-1, duas cargas de vento devem ser calculadas: A carga de vento máxima e a carga de vento de trabalho.

Carga máxima de vento

Quando a Norma Européia para cargas de vento estiver disponível ela será utilizada para o cálculo da carga máxima de vento.

Para considerar a carga de equipamentos ou materiais sobre a área de trabalho, será assumida uma área normal de referência no nível em questão por todo seu comprimento. Essa área é de 200 mm inclui a altura do rodapé. (En 12811-1, 6.2.7.4.1)

Observação: Para o projeto estrutural fachadas de andaimes executados com componentes pré-fabricados, as pressões de velocidade de projeto são dadas na norma EN 12810-1, 8.3.

Carga de vento de trabalho

A pressão de velocidade de carga uniformemente distribuída considerada é de 0,2 kN/m². Para considerar a carga de equipamentos ou materiais sobre a área de serviço, será assumida uma área nominal de referência. Essa área é de 400 mm inclui a altura do rodapé. (En 12811-1, 6.2.7.4.2)

Área da carga de vento

A carga de vento é considerada como uma carga por área. O valor dessa carga depende do próprio carregamento da área, de modo que sem o revestimento externo será considerada uma carga de vento pequena, ao contrário de uma condição com revestimento ou rede de proteção (alambrado), onde seria aplicável uma carga maior.

Princípio de combinações

De acordo com a EN 12811-1, 6.2.9.2 os casos de carga precisam ser combinados de duas formas distintas: condição em serviço e condição fora de serviço

Em cada caso individual deverão ser consideradas as condições em serviço e fora de serviço.

a) As condições em serviço consistem do seguinte:

- 1) O peso próprio do andaime
- 2) A carga de serviço uniformemente distribuída (EN 12811-1, Tabela 3, q_1) atuando na área de serviço do nível do deck mais desfavorável.
- 3) 50 % da carga especificada no item a)2) deve ser considerada atuante na área de trabalho do nível imediatamente acima ou abaixo se o andaime de trabalho tiver mais do que um nível (deck).
- 4) Carga de vento de trabalho

b) As condições fora de serviço consistem do seguinte:

- 1) O peso próprio do andaime
- 2) Uma porcentagem da carga de serviço uniformemente distribuída (EN 12811-1, Tabela 3, q_1) atuando na área de serviço do nível do deck mais desfavorável. O valor depende da classe:

Classe 1:	0%	(nenhuma carga de serviço na área de trabalho)
Classes 2 e 3:	25%	(representando alguns materiais armazenados na área de trabalho)
Classes 4, 5 e 6:	50%	(representando alguns materiais armazenados na área de trabalho)

3) Carga máxima de vento

Para os casos a)2) e b)2), a carga deve ser considerada zero, se sua consideração levar a resultados mais favoráveis.

Condições de carregamentos pelo SCIA Engineer

Os seguintes casos de carga são considerados pelo SCIA Engineer:

Caso de carga 1: Peso Próprio

Nessa condição de carregamento é incluído o peso próprio completo da estrutura, incluindo os rodapés, pranchas e etc.

Este caso e carga é calculado automaticamente pelo SCIA Engineer.

Caso de carga 2: Peso Próprio dos Rodapés (e de outros elementos estruturais)

O peso próprio dos rodapés podem ser utilizados da seguinte forma:

Área da seção transversão = $15 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} = 30 \text{ cm}^2 = 30 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Densidade do rodapé = $773,3 \text{ kg/m}^3$

Peso do rodapé por metro = $30 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 773,3 \text{ kg/m}^3 = 2,32 \text{ kg/m}$

Carga linear: $2,32 \times 9,81 \text{ N/m} = 22,76 \text{ N/m} = 0,023 \text{ kN/m}$

Caso de carga 3: Carga de serviço do deck do piso principal

Essa carga representa a carga de serviço que atua em todo o piso principal. O "Piso principal" significa o nível mais importante/crucial do andaime. Se a carga for aplicada nesse piso isso causará os valores críticos mais altos.

Nesse exemplo foi considerado um andaime de categoria 3 e uma carga de 200 kg/m^2 , ou 2 kN/m^2 (EN12811-1 Tabela 3). Essa carga é transferida para as pranchas.

Caso de carga 4: Carga útil do Segundo Piso

De forma análoga ao caso 2, a carga de trabalho neste caso de carga é considerada atuante em todo o segundo piso. O segundo piso se refere à área de trabalho acima ou abaixo do piso principal.

De acordo com o código EN12811-1, 50% da carga de trabalho deve ser aplicada no segundo piso.

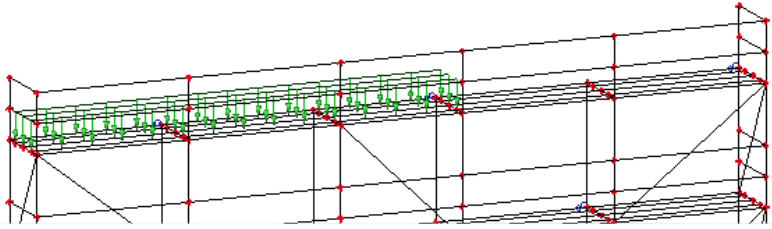
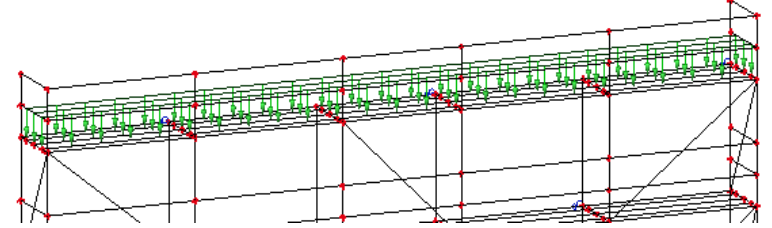
Caso de carga 5: Carga de trabalho 25%

Essa condição de carregamento representa um acúmulo de materiais e equipamentos para toda a área de trabalho principal quando o andaime estiver sujeito à carga máxima do vento.

Observação:

Em alguns casos pode ser necessário considerar uma carga não simétrica no modelo. Dessa forma pode ser importante inserir um caso de carga completamente análogo aos casos de carga 3, 4 ou 5, mas nesse caso a carga de trabalho é somente aplicada à metade do piso. Ao executar essa condição de carregamento, a estrutura ficará carregada excentricamente, portanto os efeitos que desequilibram as partes em um carregamento simétrico são revelados.

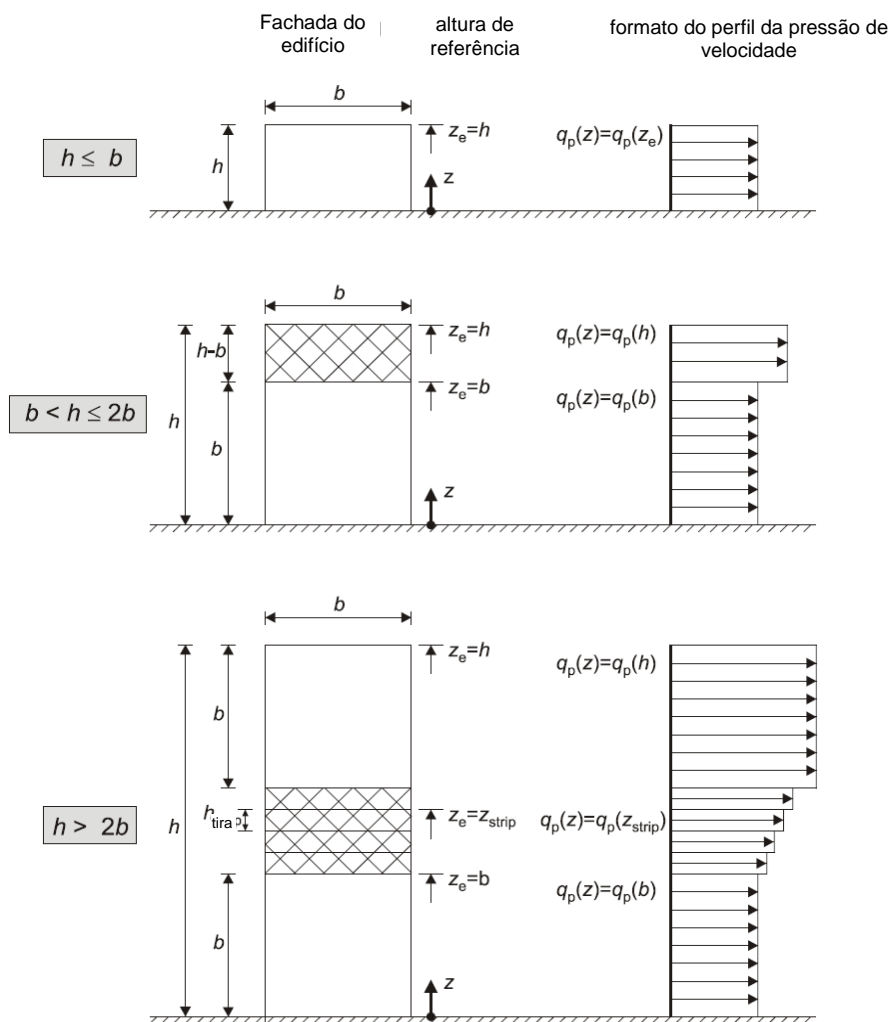
Exemplo:

<i>Totalmente carregada</i>	
<i>Metade carregada</i>	

Caso de carga 6: Carga máxima do vento perpendicular à fachada

Uma vez que o método aritmético para o cálculo de cargas de vento a partir da norma EN12811-1 não é válido para todos os andaimes com proteções de redes que circundam toda a edificação, a norma EN 1991-1-4 é adotada.

Há três casos para o cálculo de uma altura de referência (EN1991-1-4, Figura 7.4)



No exemplo discutido nesse curso, a altura é de 11 m e a fachada de 12,35 m. Como nesse caso $11\text{m} < 12,35\text{m}$, portanto, $h < b$, então claramente o vento só precisa ser calculado para $z_e = 11\text{m}$.

Nesse exemplo, o vento é calculado para uma edificação sem redes de proteção, situada na Bélgica com uma categoria III de terreno.

A categoria do terreno é determinada da seguinte forma (EN 1991-1-4, Tabela 4.1):

	Categoria do terreno	z_0 [m]	z_{min} [m]
0	Área marítima ou litorânea exposta ao mar aberto	0,003	1
I	Área com lagos, terreno plano, pouca vegetação e sem obstáculos	0,01	1
II	Área com vegetação baixa, tal como grama e obstáculos isolados (árvores, edifícios) separados entre si por pelo menos 20 vezes a altura dos obstáculos	0,05	2
III	Área coberta com vegetação comum, edifícios ou obstáculos isolados separados por no máximo 20 alturas de obstáculos (tais como vilas, terrenos suburbanos, florestas permanentes)	0,3	5

IV	Área com pelo menos 15% da superfície coberta por edifícios e altura média acima de 15 m	1,0	10
----	--	-----	----

Para a Bélgica $v_{b,0}$ é igual a 26,2m/s de acordo com a norma EC-EN. Além disso C_{dir} e C_{season} são iguais a 1. A partir desse v_b pode-se calcular (EN 1991-1-4 (4.1)):

$$\begin{aligned} v_b &= C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} \\ &= 26,2\text{m/s} \end{aligned}$$

Em terrenos categoria III a velocidade média v_m é calculada utilizando a seguinte fórmula (EN 1991-1-4 (4.3)):

$$v_m = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$$

onde

$c_o(z)$ é o fator orográfico assumido como 1,0 (a não ser que seja especificado de forma diferente na EN 1991-1-4 §4.3.3.)

e

$c_r(z)$ é o fator de rugosidade dado pela fórmula (EN 1991-1-4 (4.4)):

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{para} \quad z \leq z_{\min}$$

$$E \quad k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad (\text{EN 1991-1-4 (4.5)})$$

Com as avaliações dessas fórmulas para esse exemplo e categoria III é possível obter o seguinte:

$$k_r = 0,19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \left(\frac{0,3}{0,05} \right)^{0,07} = 0,215$$

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,215 \cdot \ln\left(\frac{11}{0,3}\right) = 0,776$$

E a velocidade média:

$$v_m = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b = 0,776 \cdot 1 \cdot 26,2 = 20,3 \text{ m/s}$$

A partir desses valores a pressão de velocidade máxima pode ser calculada pela fórmula abaixo:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b = c_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

onde

$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$$

$$c_e(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot (c_r(z))^2 \cdot (c_0(z))^2$$

$$I_v(z) = \frac{k_t}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{para} \quad z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{para} \quad z \leq z_{\min}$$

k_t é o fator de turbulência. O valor recomendado para k_t é 1,0.

Com as avaliações dessas fórmulas para esse exemplo e categoria III é possível obter o seguinte:

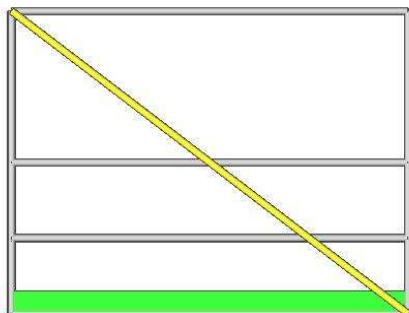
$$I_v(z) = \frac{k_t}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = \frac{1,0}{1,0 \cdot \ln\left(\frac{11}{0,3}\right)} = 0,278$$

$$c_e(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot (c_r(z))^2 \cdot (c_0(z))^2 = [1 + 7 \cdot 0,278] \cdot (0,776)^2 \cdot (1,0)^2 = 1,77$$

Dessa forma, a pressão externa é obtida da seguinte forma:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = 1,77 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot (26,2)^2 \text{ N/m}^2 = 760 \text{ N/m}^2 = 0,76 \text{ kN/m}^2$$

Além disso, podemos assumir que os elementos no plano perpendicular à carga do vento correspondam aproximadamente a 1/5 (=20%) da superfície total do modelo, conforme mostra no desenho abaixo:



20% da pressão total é aplicada nas paredes. Isso é igual a pressão máxima do vento de $0,76 \text{ kN/m}^2 \times 0,2 = 0,152 \text{ kN/m}^2$.

Código EN 12811-1 §6.2.7.4.1.:

Para considerar a carga de equipamentos ou materiais sobre a área de serviço, deverá ser assumida uma área nominal de referência no nível em questão por todo seu comprimento. Essa área deve ser de 200 mm de altura medida a partir do nível da área de trabalho e inclui a altura do rodapé. As cargas resultantes da pressão do vento sobre essa área devem ser consideradas atuantes no nível da área de trabalho.

Nesse exemplo, o rodapé já é calculado dentro do "20% da superfície total":

Nesse exemplo os rodapés têm 150mm de altura. A área de acordo com a norma EN12811-1; §6.2.7.4.1 é de 200mm, de modo que é necessário calculá-la com uma altura extra de 50mm (200mm-50mm) devido aos equipamentos da área de trabalho. 50mm de altura com um comprimento total de 2m (= 2000mm) o que corresponde a 2,5% (=50/2000).

Dessa forma, a pressão do vento é a seguinte: $0,152 \text{ kN/m}^2 + (0,025 \times 0,76 \text{ kN/m}^2) = 0,17 \text{ kN/m}^2$.

Observação 1

Ao considerar a rede na estrutura o seguinte procedimento deve ser previsto para calcular a pressão do vento sobre a estrutura (revestimento com rede = 50%): Calcule a força do vento

- 50% do vento cairá sobre a rede e será transferido e suportado pelas primeiras colunas
- 20% dos outros 50% dessa força do vento serão considerados atuantes no primeiro plano
- 20% dos outros 50% dessa força do vento serão considerados atuantes no segundo plano
- ...

Observação 2

Nesse parágrafo o vento foi calculado como uma pressão de vento. Na norma EN 12810-1a o cálculo considera as forças do vento ao invés das pressões do vento. A diferença desses métodos com relação à norma EN 1991-1-4 será discutida no Anexo A.

Caso de carga 7: Carga máxima de vento paralela à fachada

De forma análoga, a carga máxima do vento é considerada paralela à fachada da estrutura.

Além disso, são consideradas as pressões máximas do vento de $0,17 \text{ kN/m}^2$.

Caso de carga 8: Carga de trabalho do vento perpendicular à fachada

A norma EN12811-1 prescreve que se o andaime estiver em serviço será necessário que esteja carregado somente com a referida carga de trabalho do vento.

Essa carga de vento de trabalho é calculada de forma análoga à Carga Máxima do Vento no andaime, mas deve ser considerada uma pressão de $0,2 \text{ kN/m}^2$.

O cálculo é feito de forma análoga ao da pressão máxima do vento, somente a pressão de referência do vento $0,429 \text{ kN/m}^2$ (=26,2m/s) do item "Caso de carga 8" será nesse caso substituída por $0,2 \text{ kN/m}^2$:

EN 12811-1 §6.2.7.4.2:

A pressão de velocidade de carga uniformemente distribuída considerada é de $0,2 \text{ kN/m}^2$. Para considerar uma margem de tolerância para equipamentos ou materiais acomodados na área de serviço, deve-se utilizar uma área de referência conforme definida no item 6.2.7.4.1, porém, com 400 mm de altura, para o cálculo das cargas de vento de trabalho.

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot 0,2 \text{ kN/m}^2 = 1,77 \cdot 0,2 \text{ kN/m}^2 = 0,354 \text{ kN/m}^2$$

Nesse exemplo os rodapés têm 150 mm de altura. No total, o cálculo envolve uma altura extra de 250 mm (= 400mm – 150mm). Isso corresponde a 12,5% da montagem total (= 250/2000).

Subsequentemente a pressão do vento é multiplicada por 20% (superfície total dos elementos) e 12,5% (devido ao acúmulo de material).

Dessa forma, a força do vento é a seguinte: $0,354 \text{ kN/m}^2 \times (0,2+0,125) = \mathbf{0,115 \text{ kN/m}^2}$

Caso de Carga 9: Carga de trabalho de vento paralela à fachada

De forma análoga, a carga máxima de vento de trabalho é considerada paralela à fachada da estrutura. Nesse caso as pressões de vento também são $\mathbf{0,115 \text{ kN/m}^2}$.

Combinações Lineares de Carga

De acordo com os princípios descritos anteriormente nesse capítulo, as seguintes condições de carregamento são consideradas:

Combinação 1: Fora de serviço, vento perpendicular

BG1	Peso Próprio
BG2	Peso próprio de rodapés
BG5	Carga de trabalho total de 25%
BG6	Carga máxima do vento perpendicular à fachada

Combinação 2: Fora de serviço, vento paralelo

BG1	Peso Próprio
BG2	Peso próprio de rodapés
BG5	Carga de trabalho total de 25%
BG7	Carga máxima de vento paralela à fachada

Combinação 3: Em serviço, vento perpendicular

BG1	Peso Próprio
BG2	Peso próprio de rodapés
BG3	Carga útil no deck do nível térreo
BG4	Carga útil no deck do nível térreo
BG8	Carga de trabalho do vento perpendicular à fachada

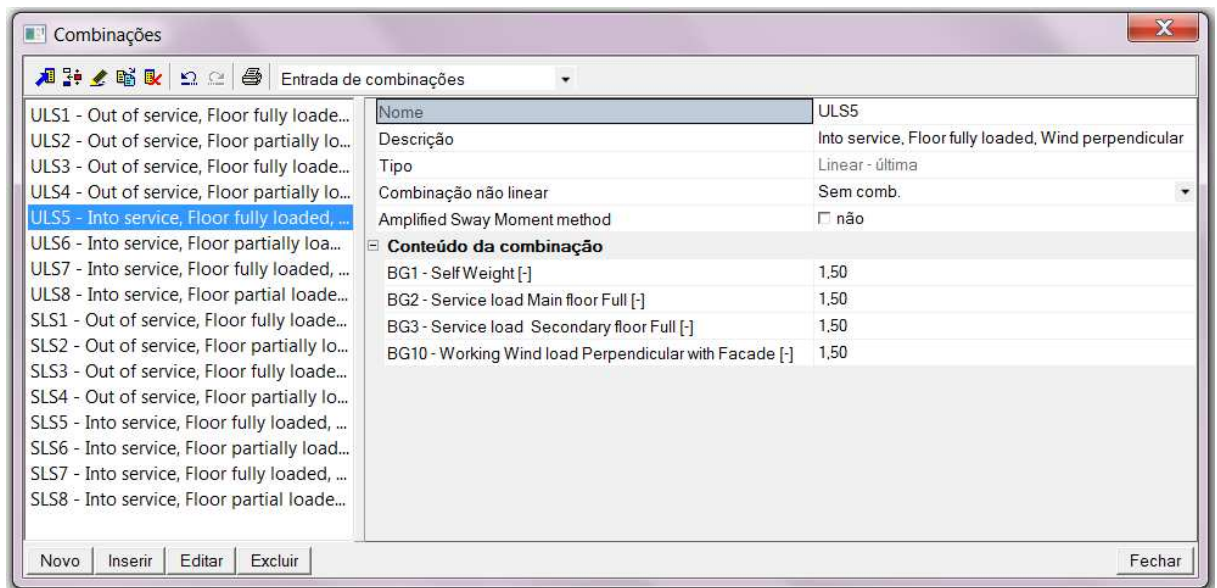
Combinação 4: Em serviço, vento paralelo

BG1	Peso Próprio
BG2	Peso próprio de rodapés
BG3	Carga útil no deck do nível térreo
BG4	Carga útil no deck do nível térreo
BG9	Carga de trabalho de vento paralela à fachada

Coeficientes

Com as combinações no Estado Limite Último será considerado o fator γ_F de **1,50** nos casos de carga, de acordo com a norma EN 12811 §10.3.2. O fator de segurança γ_M dos materiais é **1,10**.

Para γ_F e γ_M (Serviço) devem ser considerados **1,00**.



Resultados

Recomenda-se primeiramente examinar as reações. Dessa forma deve-se verificar a precisão das cargas e combinações. O protocolo de cálculo (na janela de resultados) deve ser verificado também.

A lista de materiais também pode ser encontrada no menu de resultados. Essa tabela mostra o comprimento total de cada seção transversal.

Com esses resultados cada usuário pode dividir o comprimento total de cada tipo de seção transversal pelo comprimento de um elemento para calcular o número total de travessas, necessárias à montagem.

➤ Exemplo

Scaffolding.esa

Lista de materiais

Nome	Massa [kg]	Superfície [m ²]	Volume [mm ³]
Resultados totais :	3948,4	273,918	3,3186e+09

Seção	Material	Massa unitária [kg/m]	Comprimento [m]	Massa [kg]	Superfície [m ²]	Massa por volume unitário [kg/m ³]	Volume [mm ³]
Column - RO48.3X3.2	S 235	3,6	131,800	468,7	20,420	7850,0	5,9705e+07
Ledger - RO48.3X3.2	S 235	3,6	206,330	733,7	31,967	7850,0	9,3468e+07
Guardrail - RO48.3X3.2	S 235	3,6	149,660	532,2	23,187	7850,0	6,7796e+07
Bracing - RO48.3X2.3	S 235	2,6	83,401	217,4	12,846	7850,0	2,7689e+07
Floor Board - 0,32m - RECT (40; 320)	FB 0,32	8,2	222,300	1822,9	160,056	640,6	2,8454e+09
Toeboard - RECT (150; 20)	Toeboard	2,3	74,830	173,6	25,442	773,3	2,2449e+08

Os resultados (tais como força normal, momento...) podem ser verificados por tipo de perfil (colunas, contraventamentos, travessas). Por isso recomenda-se colocar cada seção transversal em uma camada diferente. Assim, será mais fácil verificar os resultados por tipo de seção transversal.

Além da verificação dos resultados, as forças de ancoragem também devem ser verificadas. Essas forças podem ser encontradas em "Reações".

Verificação do ELS pela Norma de Aço EN 1993-1-1

Deformação relativa

Para cada tipo de viga, os valores limites para as respectivas deflexões são estabelecidas mediante a utilização do menu 'Aço > Vigas > Configuração > Deformação Relativa'.

Com a opção 'Aço > Vigas > Configuração > Deformação Relativa', as deformações relativas podem ser verificadas. As deformações relativas são dadas em valores absolutos, valores relativos correspondentes ao vão, ou como uma verificação unitária correspondente ao limite para o valor relativo do vão.

Exemplo

Relative Deformation.esa

- Configuração do tipo de viga para os elementos B20 e B23: Viga e Caibro
- Ajuste do comprimento do sistema para deformação relativa
- Ajuste dos limites para deformações relativas: Viga 1/1000 e Caibro 1/500
- Verificação de deformação relativa nos elementos B20 e B23

Deformação relativa

Cálculo linear, Extremo: Elemento, Sistema: Principal

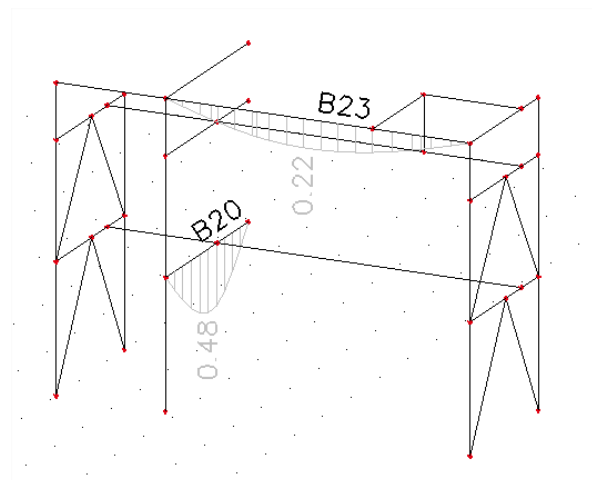
Seleção: B23, B20

Combinações: Estado Limite de Serviço (ELS)

Caso – Combinação	Elemento	dx [m]	uy [mm]	Rel uy [1/xx]	Verificação uy	uz [mm]	Rel uz [1/xx]	Verificação uz
SLS/1	B23	3.017	-0.222	1/10000	0.03	-1.598	1/3129	0.16
SLS/2	B23	3.017	0.002	1/10000	0.00	-0.311	1/10000	0.03
SLS/3	B23	2.733	-0.043	1/10000	0.01	-2.200	1/2273	0.22
SLS/4	B23	0.000	0.000	0	0.00	0.000	0	0.00
SLS/5	B20	0.000	-1.929	1/933	1.07	0.000	0	0.00
SLS/6	B20	0.000	0.037	1/10000	0.02	0.000	0	0.00
SLS/7	B20	1.500	-0.156	1/10000	0.09	-1.400	1/2072	0.48
SLS/4	B20	0.000	0.010	1/10000	0.01	0.000	0	0.00

B20: $L = 2,9\text{m} \rightarrow \text{limite: } 2900/1000 = 2,9\text{mm}$
 $U_z = -1,400\text{mm} \rightarrow 1,400/2900 = 1/2072$
 Verificação: $(1/2072) / (1/1000) = 0,48$

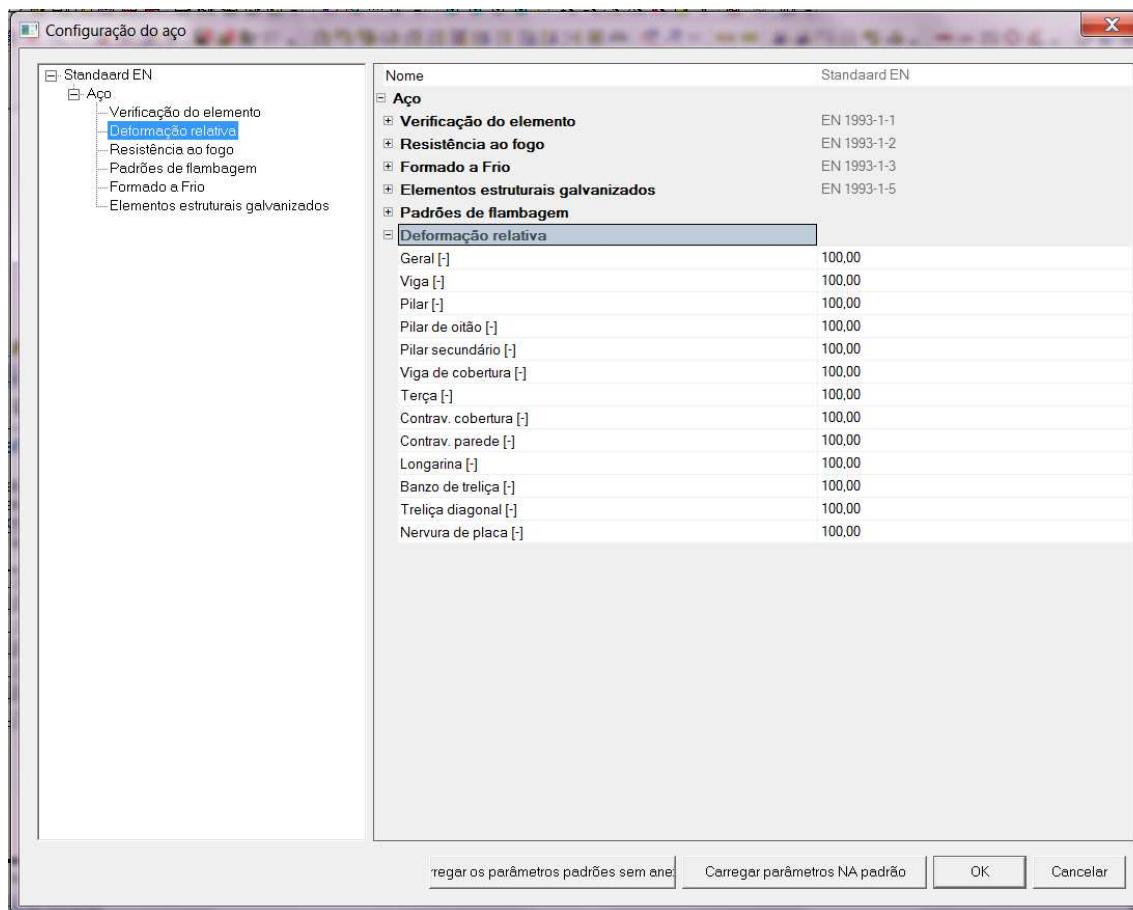
B23: $L = 5,0\text{m} \rightarrow \text{limite: } 5000/500 = 10,0\text{ mm}$
 $U_z = -2,200\text{mm} \rightarrow 2,200/5000 = 1/2273$
 Verificação: $(1/2273) / (1/500) = 0,22$



Verificação ELS do Andaime – EN 12811-1

A verificação de deformação em ELS faz parte da EC3. De acordo com código EN1281-11 a deformação permissível é de $L/100$. Esse valor limite é ajustado da seguinte forma:

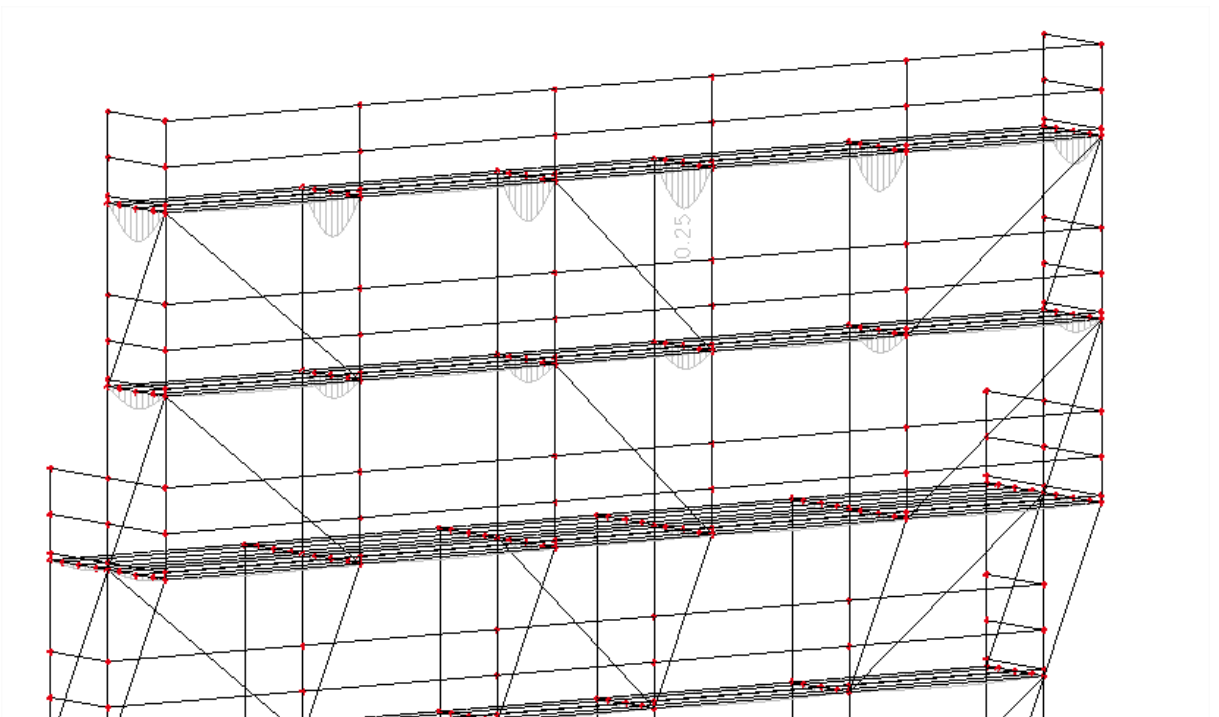
Aço -> Configuração => Configuração da Deformação => Transforma todos os valores em 100



➤ Exemplo de verificação do ELS

Scaffolding.esa

- Seleção de "Deformação Relativa" (deformação relativa) no menu de aço.
- A verificação máxima será executada para a viga B352: uma verificação unitária de 0,25.
Os valores dessa verificação são exibidos abaixo.



Deformação relativa

Cálculo linear, Extremo: Global, Sistema: Principal
 Seleção: Todos
 Classe: Alle GGT
 Seções Transversais: Travessa – RO48,3x3,2

Condição – Combinação	Elemento	dx [m]	uy [mm]	Rel uy [1/xx]	Verificação uy	uz [mm]	Rel uz [1/xx]	Verificação: uz
SLS3/1	B43	1.285	-3.3	1/780	0.13	-0.3	1/7440	0.01
SLS2/2	B43	1.285	3.4	1/760	0.13	-0.3	1/7464	0.01
SLS5/3	B352	0.545	0.0	1/10000	0.00	-2.7	1/399	0.25
SLS3/1	B7	0.818	0.0	1/10000	0.00	0.0	1/10000	0.00
SLS3/1	B7	0.818	0.0	1/10000	0.00	0.0	1/10000	0.00

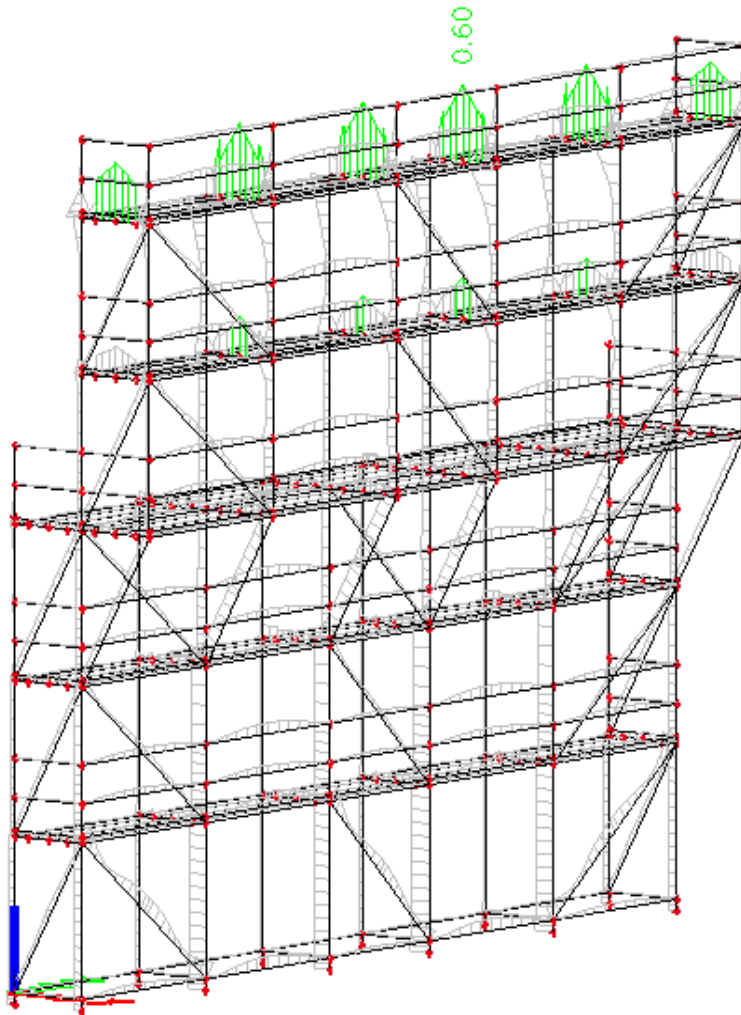
Verificação do ELU pela Norma de Aço – EN 1993-1-1

Verificação de Seção pelo SCIA Engineer

➤ Exemplo

Scaffolding.esa

- Vá para o menu "Aço-> Verificação".
- Utilize a verificação de seção.
- A máxima verificação unitária será obtida na viga B352: UC = 0,60
- Os resultados são mostrados abaixo



Verificação do aço

Cálculo linear, Extremo, Global

Seleção: Todos

Categoria: Alle UGT

Verificação de Código EN 1993-1-1

Member	B352	RO48.3X3.2	S 235	ULS5/4	0.60
--------	------	------------	-------	--------	------

Dados básicos EC3: EN 1993	
Fator de segurança parcial Gama M0 para resistência de seção transversais	1.00
Fator de segurança parcial Gama M1 para resistência à instabilidade	1.00
Fator de segurança parcial Gama M2 para resistência a seções com redes	1.25

Dados de materiais		
Tensão de escoamento f_y	235.0	MPa
Resistência à tração f_u	360.0	MPa
Fabricação - laminado	rolled	

Aviso: Esse tipo de aço selecionado é obtido a partir da tabela de espessura padrão! Verifique a redução de espessura na Biblioteca de Material.

...: VERIFICAÇÃO DE SEÇÃO

Relação largura/espessura para seções tubulares (EN 1993-1-1, Tabela 5.2, folha 3)

ratio 15.09 on position 0.225 m

Relação		
Relação máxima	1	50.00
Relação máxima	2	70.00
Relação máxima	3	90.00

==>Categoria da seção transversal 1

A verificação crítica é na posição 0,545 m

Forças internas		
N _{Ed}	-1.74	kN
V _{y,Ed}	-0.04	kN
V _{z,Ed}	1.31	kN
T _{Ed}	0.00	kNm
M _{y,Ed}	0.92	kNm
M _{z,Ed}	-0.01	kNm

Aviso: A torção não é considerada para essa seção transversal!

Verificação à compressão

De acordo com o artigo EN 1993-1-1, 6.2.4 e fórmula (6.9)

A classificação da seção é 1

Tabela de valores		
N _{c,Rd}	106.46	kN
Verificação unitária	0.02	-

Verificação de força cortante (V_y)

De acordo com o artigo EN 1993-1-1, 6.2.6 e fórmula (6.17)

Tabela de valores		
V _{c,Rd}	39.13	kN
Verificação unitária	0.00	-

Verificação de força cortante (V_z)

De acordo com o artigo EN 1993-1-1, 6.2.6 e fórmula (6.17)

Tabela de valores		
V _{c,Rd}	39.13	kN
Verificação unitária	0.03	-

Verificação de momento fletor (M_y)

De acordo com o artigo EN 1993-1-1, 6.2.5 e fórmula (6.12)

Tabela de valores		
M _{c,Rd}	1.52	kNm
Verificação unitária	0.60	-

Verificação do Momento Fletor (Mz)

De acordo com o artigo EN 1993-1-1, 6.2.5 e fórmula (6.12)
A classificação da seção é 1

Tabela de valores		
Mc,Rd	1.52	kNm
Verificação unitária	0.00	-

Verificação de combinação de momento fletor, força axial e força cortante

De acordo com o artigo EN 1993-1-1, 6.2.9.1 e fórmula (6.41)
A classificação da seção é 1

Tabela de valores		
MNVy,Rd	1.52	kNm
MNVz,Rd	1.52	kNm

alfa 2.00 beta 2.00
Verificação unitária 0.36 -

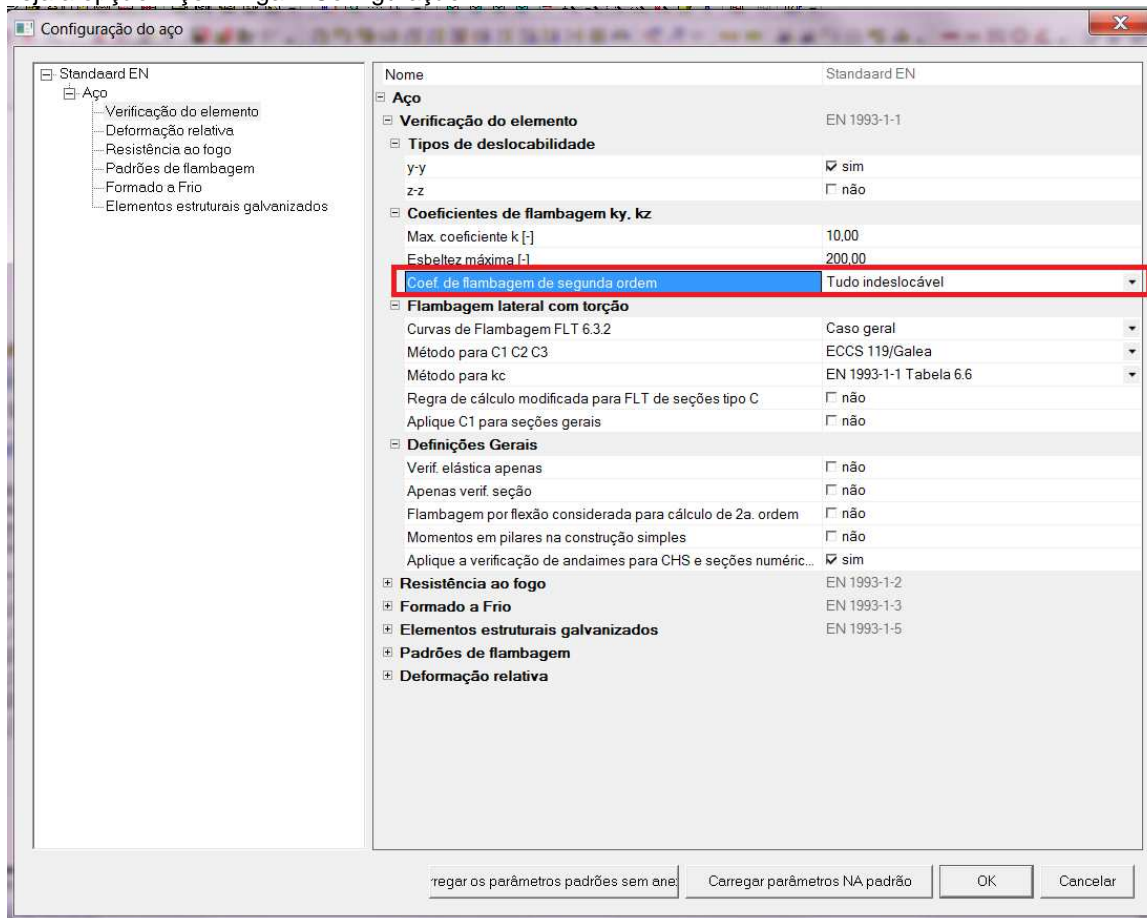
Verificação de Estabilidade

Dados de flambagem

Os diferentes comprimentos e tipos de oscilação precisam ser introduzidos. Os valores padrões podem ser desconsiderados pelo usuário.

Durante a análise não linear o tipo de deslocabilidade pode ser definido pela entrada do usuário como não deslocável ou 'l = L'

Veja a opção 'Aço > Viga > Configuração':



Coefficiente de Flambagem

Para o cálculo coeficientes de flambagem, são utilizadas algumas fórmulas aproximadas. Essas fórmulas são abordadas no Contexto Teórico (Ref.[32]).

As seguintes fórmulas são utilizadas para os índices de esbeltez:

- Para uma estrutura não oscilante:

$$l/L = \frac{(\rho_1 \rho_2 + 5 \rho_1 + 5 \rho_2 + 24)(\rho_1 \rho_2 + 4 \rho_1 + 4 \rho_2 + 12)^2}{(2 \rho_1 \rho_2 + 11 \rho_1 + 5 \rho_2 + 24)(2 \rho_1 \rho_2 + 5 \rho_1 + 11 \rho_2 + 24)}$$

- Para uma estrutura oscilante:

$$l/L = x \sqrt{\frac{\pi^2}{\rho_1 x} + 4}$$

Onde	L	Comprimento do sistema
	E	Módulo de Young
	I	Momento de inércia
	C _i	Rigidez no nó I
	M _i	Momento no nó I
	F _i	Rotação no nó I

$$x = \frac{4 \rho_1 \rho_2 + \pi^2 \rho_1}{\pi^2 (\rho_1 + \rho_2) + 8 \rho_1 \rho_2}$$

$$\rho_i = \frac{C_i L}{EI}$$

$$C_i = \frac{M_i}{\phi_i}$$

Os valores de M_i e φ_i são determinados aproximadamente pelas forças internas e deformações, calculadas por condições de carregamento que geram formas de deformação com afinidade à forma da flambagem.

As seguintes condições de carregamento são consideradas:

- Caso de carga 1: Nas vigas, são utilizadas as cargas distribuídas locais q_y=1 N/m e q_z=-100 N/m, nas colunas são utilizadas as cargas globais distribuídas Q_x = 10000 N/m e Q_y =10000 N/m.
- Condição de Carregamento 2: Nas vigas, são utilizadas as cargas distribuídas locais q_y=1 N/m e q_z=-100 N/m, nas colunas são utilizadas as cargas globais distribuídas Q_x = 10000 N/m e Q_y =10000 N/m.

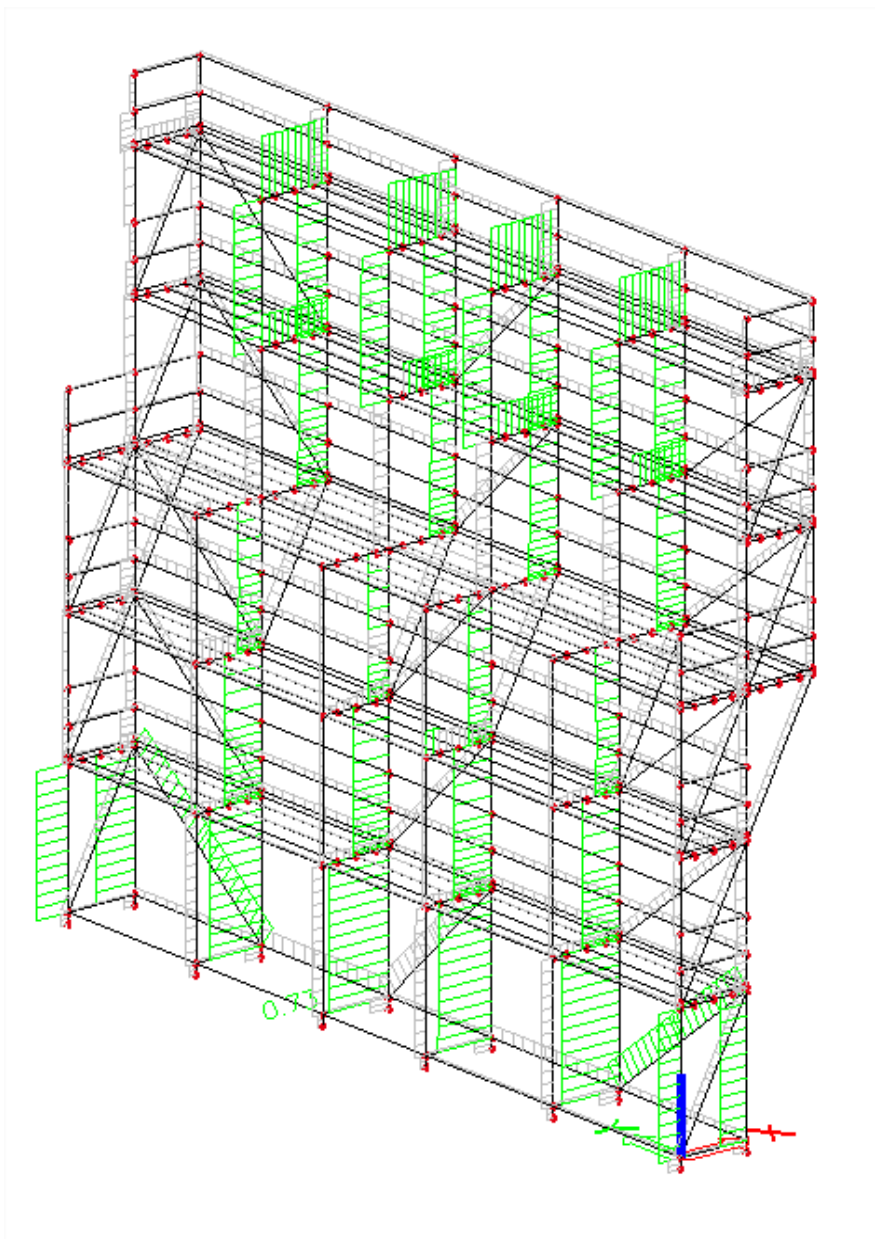
O método utilizado apresenta bons resultados para as estruturas de armações com ligações de viga perpendiculares rígidas e semi-rígidas. Para outros casos o usuário deve avaliar os coeficientes de flambagem apresentados.

Verificação de Estabilidade pelo SCIA Engineer

➤ Exemplo

Scaffolding.esa

- Vá para o menu “Aço -> Verificações”
- Utilize a verificação de Estabilidade para a categoria All UGT.
- A máxima verificação unitária será obtida na viga B24: $UC = 0,73$
- Os resultados são mostrados abaixo



...:VERIFICAÇÃO DE ESTABILIDADE

Flexural Buckling Check

De acordo com o artigo EN 1993-1-1, 6.3.1.1, e fórmula (6.46)

Parâmetros de flambagem	yy	zz	
Tipo de oscilação - oscilação	sway	non-sway	
Comprimento do sistema L	1.090	0.320	m
Fator de flambagem (índice de esbeltez) k	1.73	0.51	
Comprimento de flambagem Lcr	1.888	0.163	m
Carga crítica de Euler Ncr	67.46	9012.75	kN
Esbeltez	117.97	10.21	
Lambda de esbeltez relativa	1.26	0.11	
Lambda de limite de esbeltez	0.20	0.20	

A esbeltez ou força de compressão é de tal forma que os efeitos de Flexão por Flambagem devem ser ignorados de acordo com a EN 1993-1-1, artigo 6.3.1.2 (4)

Verificação da Flambagem Lateral por Torção

Observação: A seção transversal corresponde a uma seção CHS não susceptível a Flambagem Lateral por Torção

Verificação de compressão e momento fletor

De acordo com o artigo EN 1993-1-1, 6.3.1.1, e fórmula (6.61), (6.62)

Método de Interação 1

Tabela de valores		
k _{yy}	1.032	
k _{yz}	0.610	
k _{zy}	0.625	
k _{zz}	1.008	
Delta My	0.00	kNm
Delta Mz	0.00	kNm
A	4.5300e+02	mm ²
Wy	6.4800e+03	mm ³
Wz	6.4800e+03	mm ³
NRk	106.46	kN
My,Rk	1.52	kNm
Mz,Rk	1.52	kNm
My,Ed	0.92	kNm
Mz,Ed	0.01	kNm
Interaction Method 1		
Mcr0	209.09	kNm
reduced slenderness 0	0.09	
C _{my,0}	0.998	
C _{mz,0}	1.000	
C _{my}	0.998	
C _{mz}	1.000	
C _{mLT}	1.000	
μ _{yy}	1.000	
μ _{zz}	1.000	
w _y	1.350	
w _z	1.350	
n _{pl}	0.016	
a _{LT}	0.000	
b _{LT}	0.000	
c _{LT}	0.000	
d _{LT}	0.000	
e _{LT}	0.000	
C _{yy}	0.992	
C _{yz}	0.983	
C _{zy}	0.983	
C _{zz}	0.992	

$$\text{Verificação unitária (6.61)} = 0.02 + 0.62 + 0.00 = 0.64$$

$$\text{Verificação unitária (6.62)} = 0.02 + 0.38 + 0.00 = 0.40$$

O elemento satisfaz a verificação de estabilidade!

Verificação do ELU do Andaime – EN 12811-1-1

Geral

Para uma verificação do aço de aodo com a EC3, são utilizadas as combinações do ELU.

Se necessário, os ajustes de flambagem dos elementos precisará ser verificada.

Recomenda-se remover a seleção da opção Montante sem contraventamento no menu "Aço -> Configurações -> Configuração da verificação de elementos de aço" para ambas as direções.

Demais ajustes sobre dados de flambagem podem ser adaptados na janela correspondente de cada elemento clicando nos três pontos ao lado de "Flambagem e comprimentos relativos".

Após todos os ajustes estarem corretamente ajustados, a verificação pode ser executada por meio da funo "Aço -> Verificação". Além disso, recomenda-se revisar a verificação por tipo de perfil.

Essa é a verificação normal do aço exibida, mas para o andaime será adicionada uma verificação suplementar. Essa verificação  executada com as formulas de interação apresentadas abaixo.

	$\frac{V}{V_{pl,d}} \leq \frac{1}{3}$	$\frac{1}{3} < \frac{V}{V_{pl,d}} \leq 0,9$
$\frac{N}{N_{pl,d}} \leq \frac{1}{10}$	$\frac{M}{M_{pl,d}} \leq 1$	$\frac{M}{M_{pl,d} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_{pl,d}}\right)^2}} \leq 1$
$\frac{1}{10} < \frac{N}{N_{pl,d}} \leq 1$	$\frac{M}{M_{pl,d} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot N}{2N_{pl,d}}\right)} \leq 1$	$\frac{M}{M_{pl,d} \cdot \left[\sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_{pl,d}}\right)^2} \cos\left(\frac{\pi \cdot N}{2N_{pl,d} \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_{pl,d}}\right)^2}}\right) \right]}$

De acordo com o Eurocódigo, a verificação são será prescrita de acordo com o lado esquerdo da tabela

$$\frac{V}{V_{pl,d}} \leq \frac{1}{3}$$

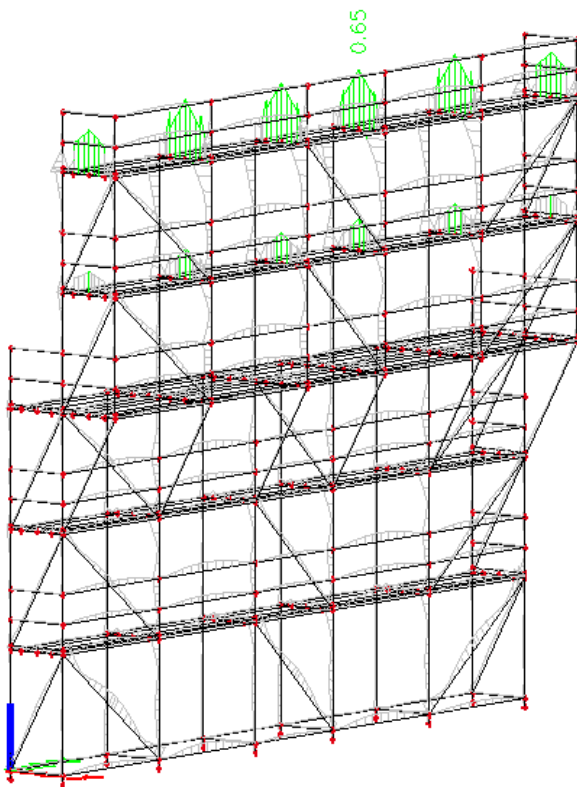
Se essa condio não for atendida, a montagem deverá ser adaptada. No entanto, essa é uma verificação muito pesada, motivo pelo qual é adicionada uma segunda coluna pelo SCIA Engineer, que na verdade, é prescrita pela norma DIN.

Verificação do Andaime pelo SCIA Engineer

Exemplo

Scaffolding.esa

- Selecione "Verificação do Andaime" na verificação pela norma de aço.
 - A verificação máxima será encontrada para a viga B352: uma verificação unitária de 0,65.
- Os valores dessa verificação são exibidos abaixo.



A verificação crítica é na posição 0,545 m

Forças internas		
NEd	-1.74	kN
Vy,Ed	-0.04	kN
Vz,Ed	1.31	kN
TEd	0.00	kNm
My,Ed	0.92	kNm
Mz,Ed	-0.01	kNm

Verificação do andaime

De acordo com a DIN4420:1, artigo 5.4.7.4 e tabela 7

Tabela de valores.		
Npl.d	106.46	kN
Vpl.d	39.13	kN
Mpl.d	1.41	kNm
Verificação unitária	0.65	-

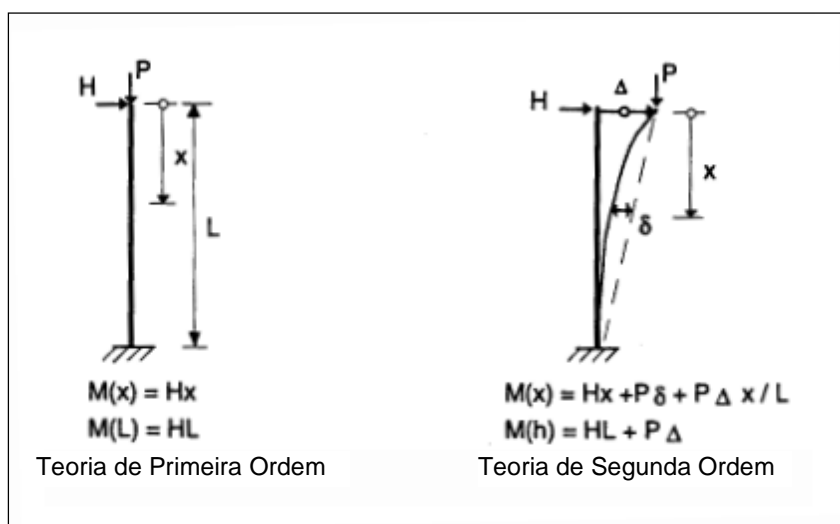
Combinações Não Lineares

Visão Geral

A análise global tem por objetivo determinar a distribuição das forças e momentos internos e os deslocamentos correspondentes em uma estrutura sujeita a um carregamento específico. A primeira distinção importante que pode ser feita entre os métodos de análise é aquela que separa o método elástico do plástico. A análise plástica é sujeita a algumas restrições. Outra distinção importante é aquela entre os métodos que permitem tolerância e os que desconsideram os efeitos da configuração deslocada da estrutura. Eles se referem respectivamente a métodos baseados na **teoria de segunda ordem e teoria de primeira ordem**.

A teoria de segunda ordem pode ser adotada em todos os casos, enquanto que a teoria de primeira ordem pode ser utilizada somente quando os efeitos de deslocamento no comportamento da estrutura forem desprezíveis.

Os efeitos de segunda ordem são compostos por efeitos locais ou de segunda ordem em elementos, indicados por efeito P- δ e por um efeito de segunda ordem global, indicado por efeito P- Δ .



A página seguinte mostrará uma visão geral da análise global de acordo com a EN 1993-1-1, capítulo 5:

- Todas as regras nessa visão geral são dadas na EN 1993-1-1, art. 5. A regra será indicada para cada etapa. A primeira regra ($\alpha_{cr} \geq 10$) será explicada na EN 1993-1-1 **art. 5.2.1(3)**. 3 caminhos serão definidos nessa visão geral:
 - Caminho 1: Nesse caminho será executado um cálculo de primeira ordem
 - Caminho 2: Nesse caminho será executado um cálculo de segunda ordem com imperfeições globais e locais.
 - Caminho 3: Nesse caminho será executado um cálculo de segunda ordem com o formato de flambagem da montagem como imperfeição.
- O cálculo se tornará mais preciso ao selecionar um caminho de nível mais alto.
- Os caminhos de nível mais baixo resultarão em um cálculo mais rápido porque um cálculo de primeira ordem pode ser executado sem interações, mas a teoria de primeira ordem pode ser utilizada somente quando os efeitos de deslocamento no comportamento da estrutura forem desprezíveis.
- Nos próximos parágrafos serão explicadas as regras dessa visão geral.

Para levar em consideração todas as não linearidades no modelo são utilizadas combinações de cargas não lineares.

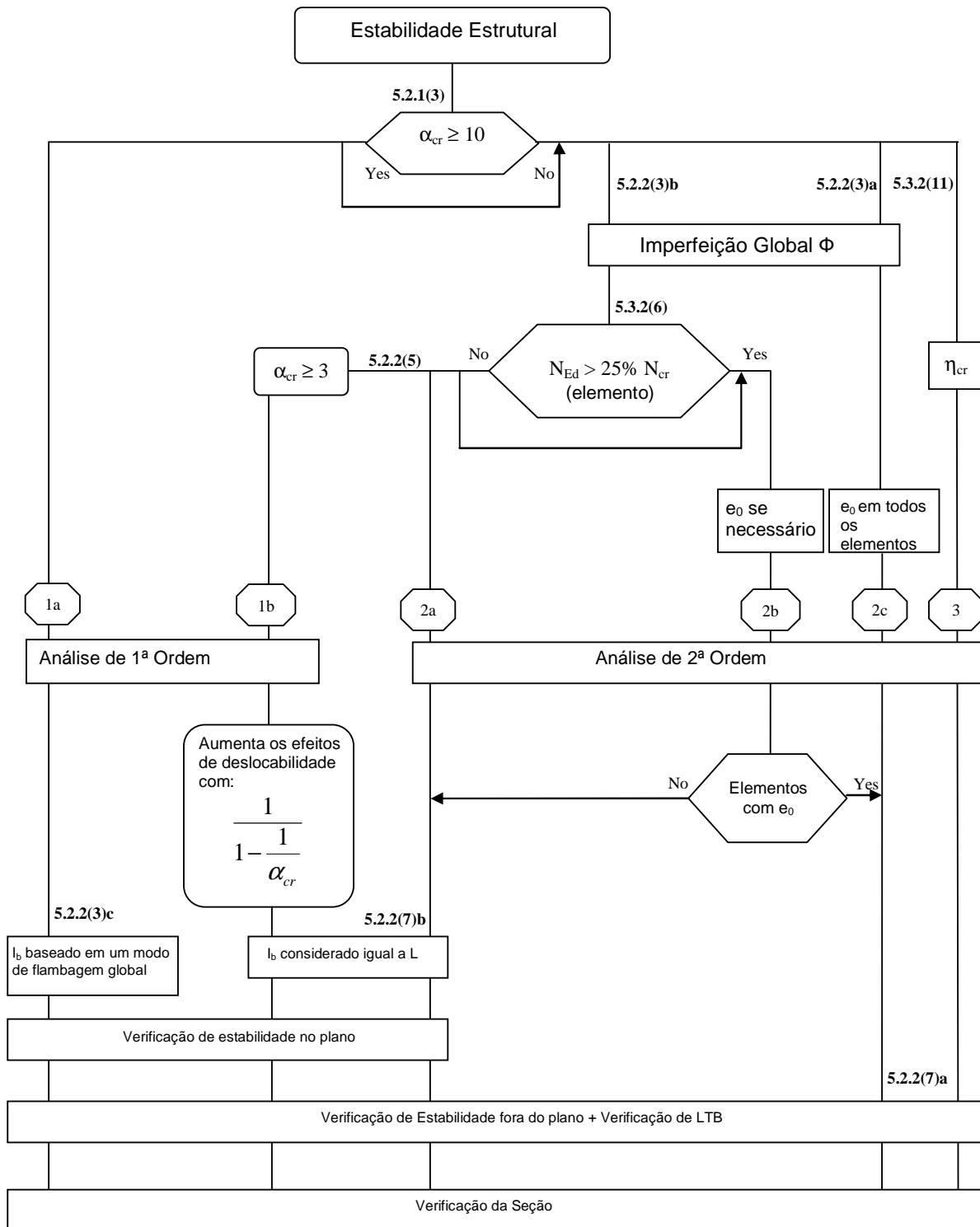
Além disso, o seguinte também aplicável de acordo com o código **EN 12810**:

Fase do Projeto	Caminho 1		Caminho 2	
	Sistemas modulares e estruturais		Sistemas estruturais apenas	
1	Teste de configurações, dispositivos de ligação e componentes			
2/3			Determinação de α_{Cl}	
			Continuação do caminho 2 somente se $\alpha_{cr} \geq 2$; Se $\alpha_{cr} < 2$ avance para o caminho 1	
3	3a	Análise da estrutura para determinar a distribuição de forças e momentos utilizando		
		Teoria de segunda ordem	Teoria de primeira ordem com fatores de amplificação baseados em α_{cr}	
	3b	Análise dos componentes e ligações individuais para verificar se a resistência está adequada		
4	Um teste em uma seção representativa de uma configuração de sistema			
	Tipo I Para a verificação de comportamento de deslocamento de carga significativo		Tipo 2 Para a verificação de α_{cr}	
<i>α_{cr} é o fator de carga de flambagem menos elástico a ser aplicado nas cargas de projeto</i>				

Podemos concluir que um cálculo de segunda ordem será sempre recomendável. Esse cálculo de segunda ordem implica em considerar as imperfeições locais e globais, de modo que nenhuma combinação não linear seja utilizada.

A combinação não linear é feita conforme descrito no capítulo anterior.

O procedimento geral para a nova EC-EN é mostrado de acordo com o seguinte diagrama.



Onde:

η_{cr}	Modo de flambagem crítica elástico.
L	Comprimento do sistema do elemento
l _b	Comprimento da flambagem

Caminho 1a especifica o chamado Método de Coluna Equivalente. Nas etapas 1b e 2a “l_b pode ser considerado igual a L”. Isso é de acordo com a EC-EM, de modo que o usuário não precise calcular o coeficiente de flambagem =1.
Em outras análises um coeficiente de flambagem menor que 1 pode ser justificado.

Alfa crítico

O cálculo de alfa crítico é feito por meio do cálculo de estabilidade pelo SCIA Engineer. Para esse cálculo é necessário uma edição Profissional ou Expert. O cálculo da estabilidade foi considerado no módulo essas.13.

De acordo com a EN 1993-1-1, a Análise de 1ª Ordem pode ser utilizada para uma estrutura se o aumento das forças ou momentos internos relevantes ou qualquer outra alteração do comportamento estrutural causada por deformações puder ser desconsiderado. Essa condição pode ser considerada atendida se o seguinte critério for satisfeito:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \text{ para análise elástica}$$

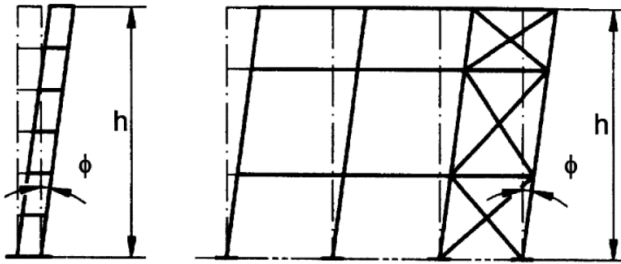
Onde: α_{cr} : fator pelo qual o carregamento de projeto precisa ser aumentado para causar uma instabilidade elástica de um modo global.
 F_{Ed} : o carregamento de projeto na estrutura.
 F_{cr} : a carga de flambagem crítica elástica para a instabilidade global, baseada em uma rigidez elástica inicial.

Se α_{cr} tiver um valor abaixo de 10, será necessário executar um Cálculo de 2ª Ordem. Dependendo do tipo de análise, as imperfeições Global e Local devem ser consideradas.

A EN1993-1-1 prescreve que os efeitos de 2ª Ordem e imperfeições podem ser considerados tanto pela análise global, quanto parcialmente pela análise global e parcialmente por meio de verificações da estabilidade dos elementos.

Imperfeição da estrutura global ϕ

A imperfeição da estrutural global será considerada para toda a estrutura por meio de um valor de imperfeição ϕ . Esse valor pode ser calculado com a seguinte fórmula (EN 1993-1-1, art. 5.3.2(3)a):

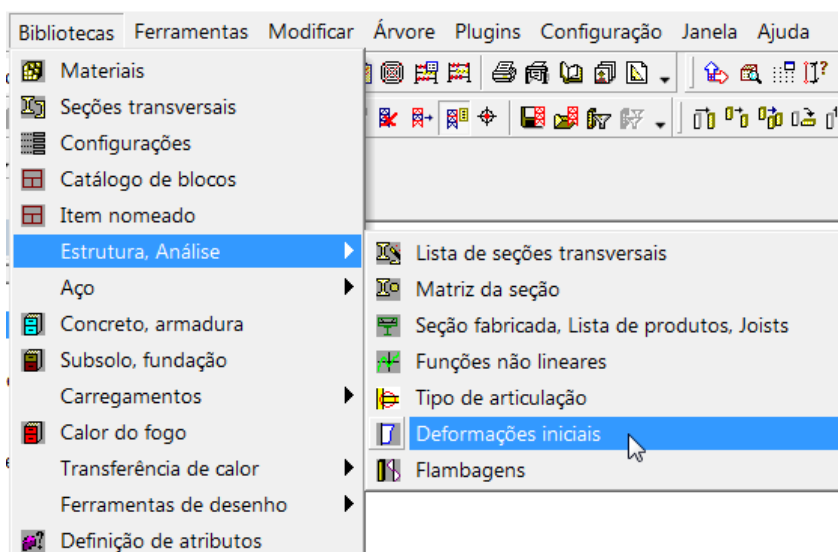


- $\phi = \frac{1}{200} \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$
- $\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$ but $\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0$
- $\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$

Onde: h A altura da estrutura em metros

- m O número de colunas em um alinhamento de colunas incluindo somente aquelas que suportam uma carga vertical N_{Ed} não inferior a 50% da média da carga vertical por coluna no plano considerado.

Essas funções de inclinação são inseridas por meio da função “Bibliotecas -> Estrutura, Análise -> Deformações iniciais”:



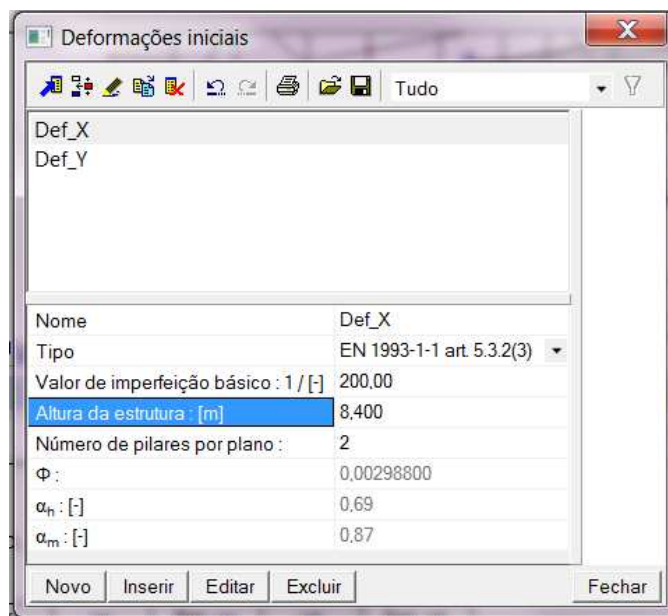
O Tipo é selecionado de “de acordo com a norma” com uma imperfeição padrão de 1/200.

A altura da montagem é de 8,4 m para ambas as funções de inclinação.

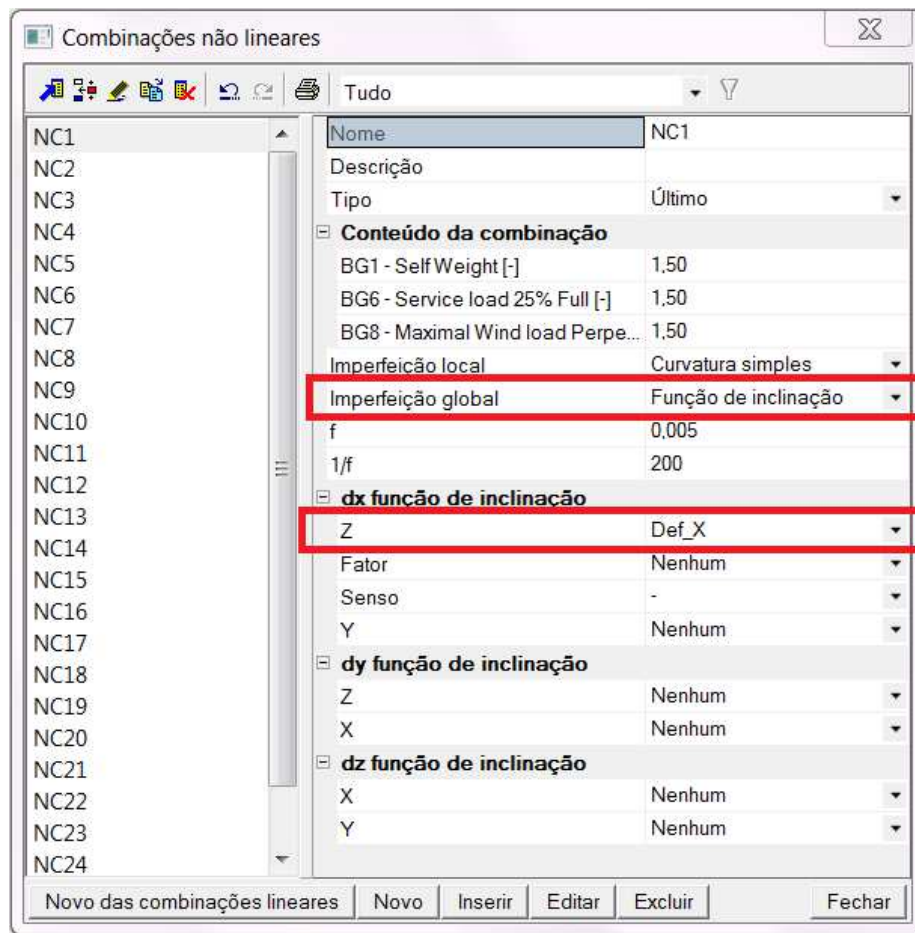
Há 6 colunas na direção X, mas no vão central apenas 2 colunas são inseridas. Devido ao fato de longa parte da estrutura ter apenas 2 colunas na direção x, nesse exemplo o número de colunas nessa direção foi considerado “2”.

Há um total de 11 colunas na direção Y. Mas as colunas da extremidade são menores que as centrais. Dessa forma, esse exemplo mostra “9” colunas consideradas na direção Y.

A função de inclinação para a direção X (Def_X) de acordo com o SCIA Engineer é exibida abaixo:

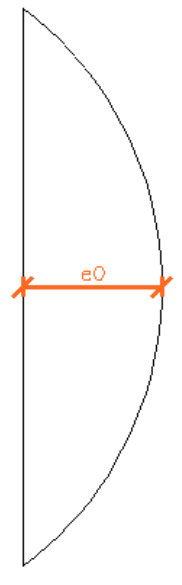


Todas as combinações são consideradas quatro vezes, uma vez com a inclinação de acordo com X positivo, outra com Y positivo e subsequentemente X negativo e Y negativo:



Imperfeição inicial em arco e_0

A imperfeição inicial em arco é dada pelo seguinte:



Arco de flambagem de acordo com a Tabela 6.1	Análise elástica	Análise plástica
	e_0 / L	e_0 / L
a_0	1 / 350	1 / 300
a	1 / 300	1 / 250
b	1 / 250	1 / 200
c	1 / 200	1 / 150
d	1 / 150	1 / 100

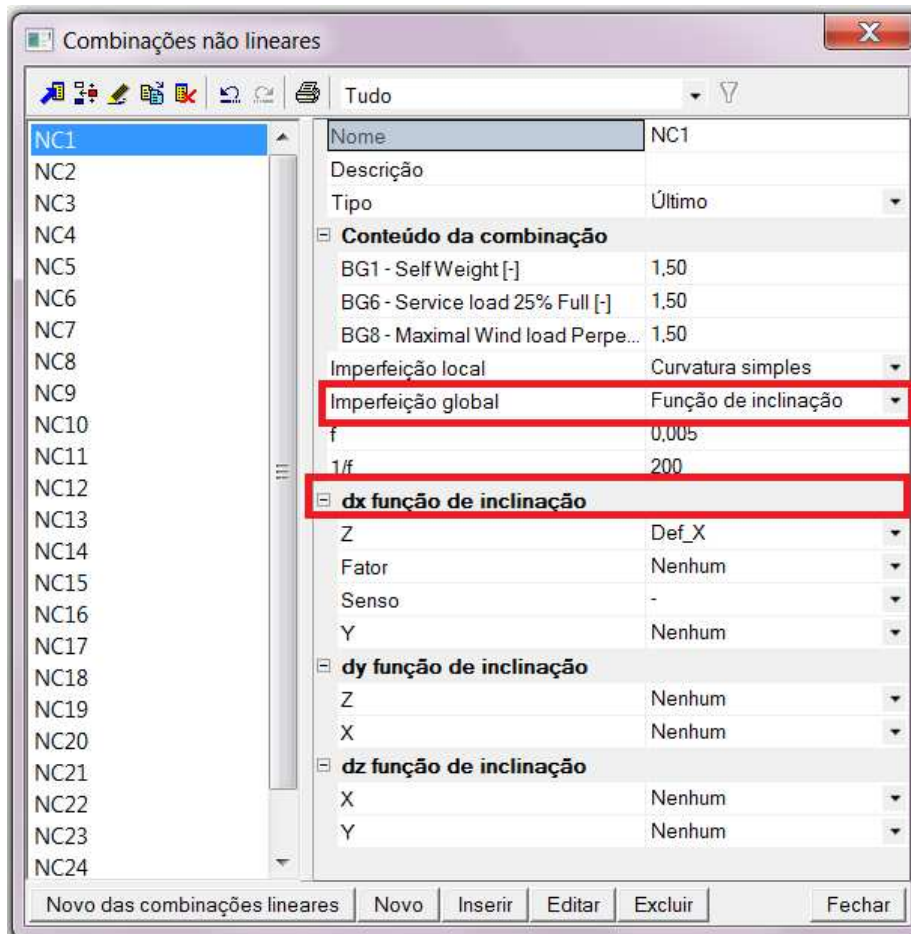
Onde L é o comprimento do elemento.

A curva de flambagem utilizada para o cálculo da imperfeição é a curva considerada na biblioteca de seção transversal. Para seção padrão, é utilizada automaticamente a curva de acordo com a norma, para seções transversais não padrão (seções gerais) o usuário deve considerar a curva de flambagem manualmente.

Onde L é o comprimento do elemento.

A imperfeição em arco deve ser aplicada quando a força normal N_{Ed} em um elemento for superior a 25% da carga N_{cr} de flambagem vertical crítica do elemento.

O SCIA Engineer pode calcular a imperfeição local automaticamente de acordo com a norma para todos os elementos necessários. Mas em uma estrutura de andaime, todos os perfis apresentam a mesma curva de flambagem, e, assim sendo, a mesma imperfeição local. Essa imperfeição em arco é considerada como uma "simples curvatura": a mesma curvatura para todos os elementos.



Cálculo de segunda ordem

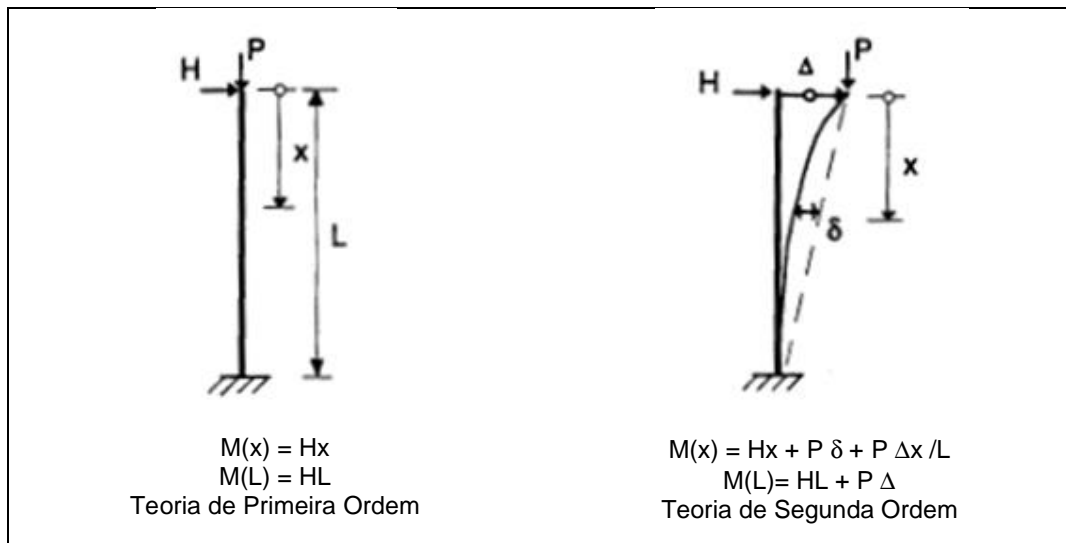
Timoshenko

O primeiro método é chamado método de **Timoshenko** (Th.II.O) que é baseado na solução exata do Timoshenko para elementos com força normal conhecida. É uma teoria de 2ª Ordem com o equilíbrio da estrutura deformada que assume pequenos deslocamentos, pequenas rotações e pequenos esforços.

Quando a força normal em um elemento for menor que a carga de flambagem crítica, esse método é muito seguro. A força axial é assumida constante durante a deformação. Portanto, o método é aplicável quando as forças normais (ou forças de membrana) não são consideravelmente alteradas após a primeira interação. Isso realmente ocorre a estruturas, edificações etc. para as quais o método é a opção mais eficaz.

A influência da força normal na rigidez de flexão e os momentos adicionais causados pelos deslocamentos laterais da estrutura (efeito P-Δ) são considerados nesse método.

Esse princípio é ilustrado na seguinte figura.

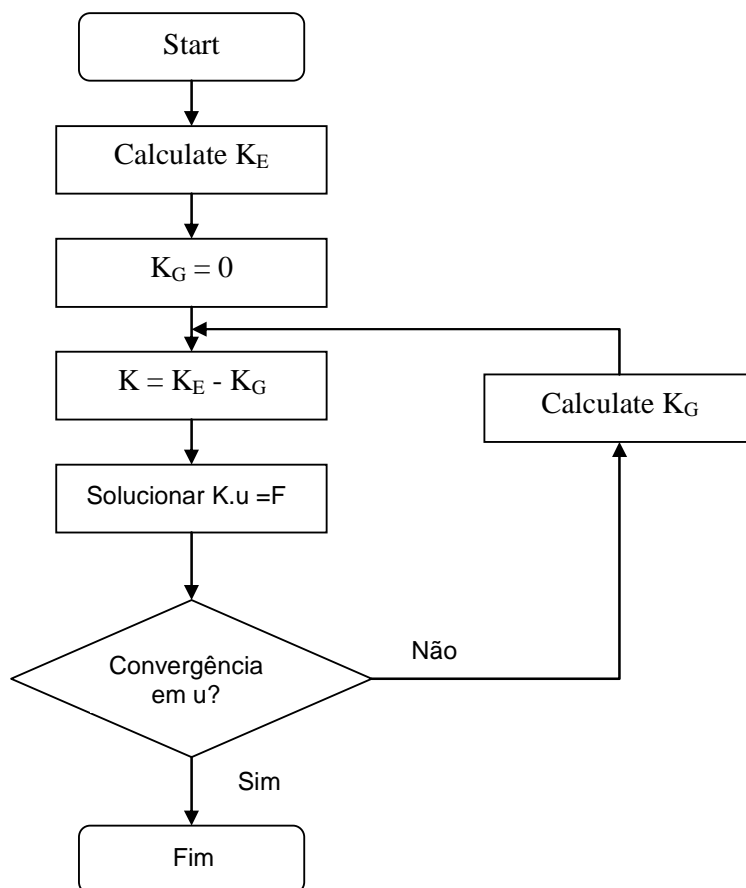


O efeito de P-δ local será considerado mais adiante nesse curso.

Se os elementos da estrutura não estiverem em contato com o subsolo e não formarem nervuras de placas, a malha de elementos finitos dos elementos não deve ser refinada.

O método precisa de apenas duas etapas, que leva a uma grande eficiência. Na primeira etapa, as forças axiais são solucionadas. Na segunda etapa, as forças axiais determinadas são utilizadas para a solução exata do método de Timoshenko. A solução original foi generalizada pelo SCIA ENGINEER para permitir levar em consideração as deformações causadas pelas forças cortantes.

A técnica aplicada é chamada de “método de força total” ou “método de substituição”. Em cada etapa de iteração, a rigidez total da estrutura é adaptada e a estrutura é recalculada até haver convergência. Essa técnica é ilustrada no diagrama a seguir.



Nessa figura a rigidez K é dividida em rigidez elástica K_E e rigidez geométrica K_G . A rigidez geométrica reflete o efeito das forças axiais em vigas e lajes. O símbolo u ilustra os deslocamentos e F a força matriz.

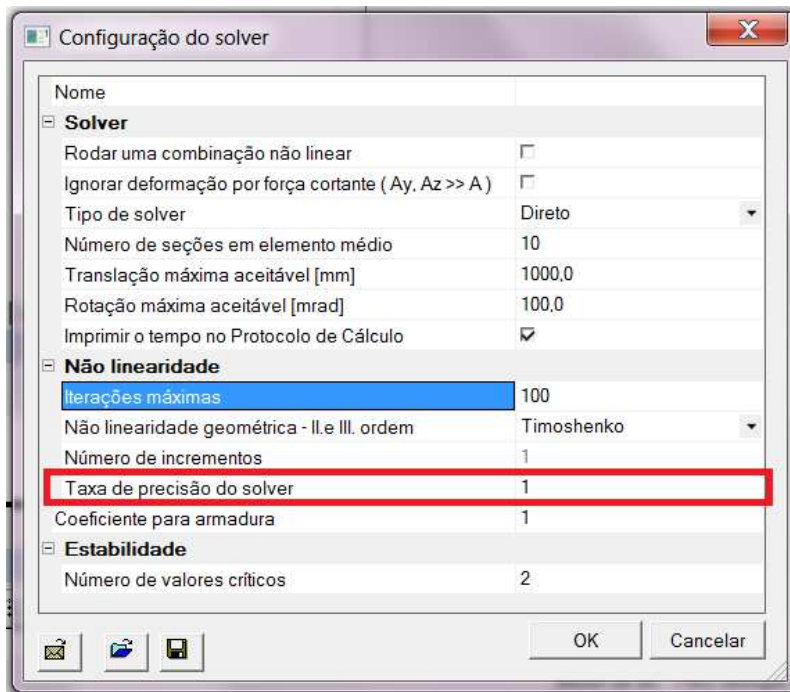
Os critérios para convergência são definidos abaixo:

$$\frac{\sum(u_{x,i}^2 + u_{y,i}^2 + u_{z,i}^2) - \sum(u_{x,i-1}^2 + u_{y,i-1}^2 + u_{z,i-1}^2)}{\sum(u_{x,i}^2 + u_{y,i}^2 + u_{z,i}^2)} \leq 0,005 / (\text{coeficiente de precisão})$$

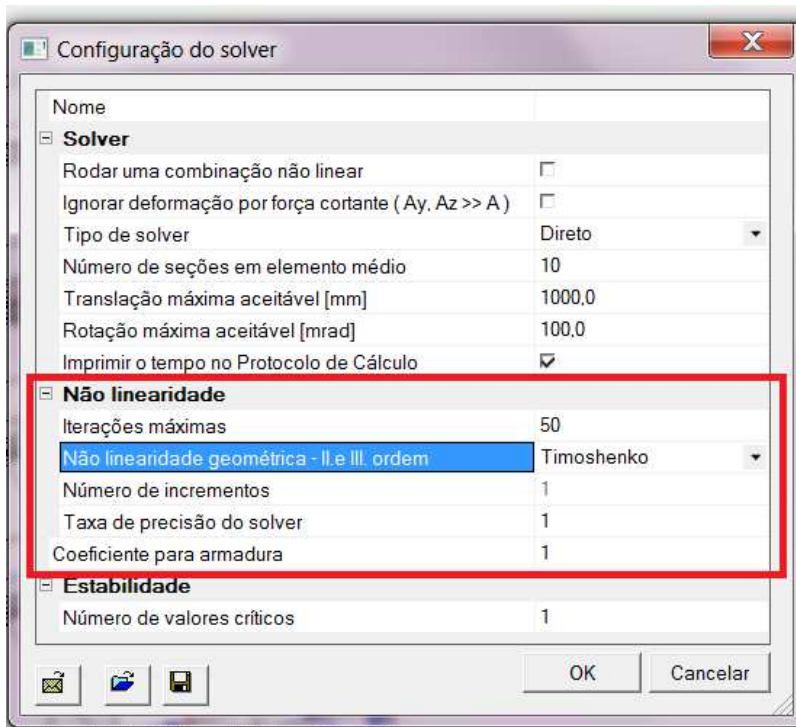
Onde:

- $u_{x,i}$ O deslocamento na direção x para a iteração i.
- $u_{y,i}$ O deslocamento na direção y para a iteração i.
- $u_{z,i}$ O deslocamento na direção z para a iteração i.

Essa precisão de convergência pode ser adaptada na configuração do solver:



A escolha do Método de Timoshenko e a quantidade máxima de iterações podem ser especificados por meio da função Cálculo, Malha > Configuração do Solver.

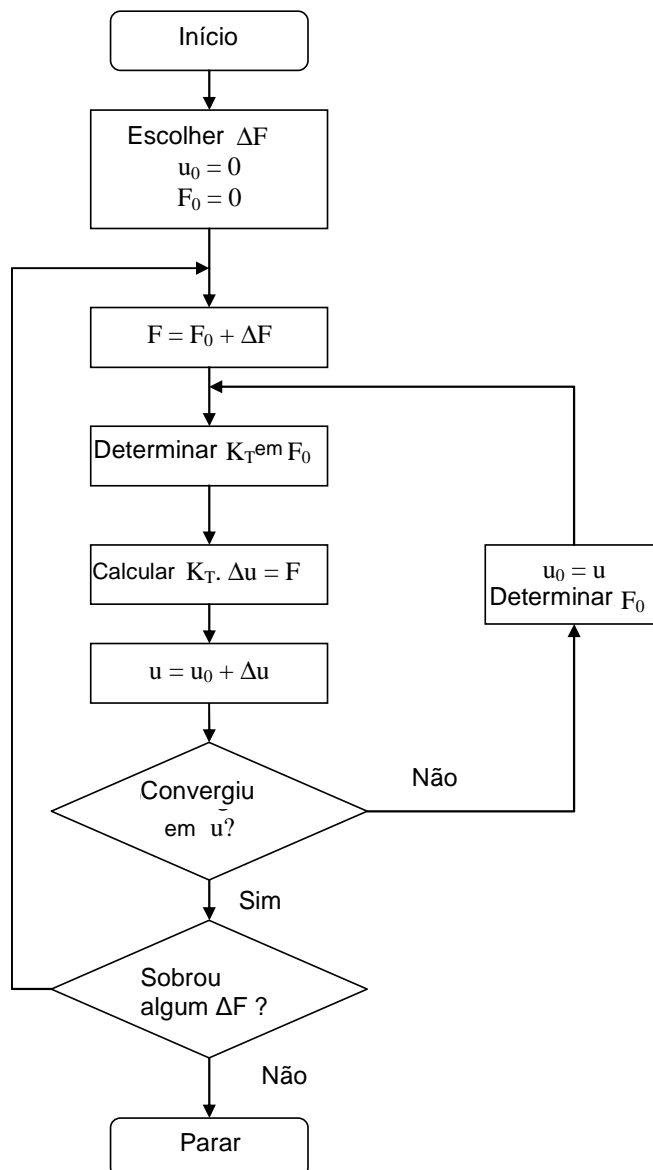


Newton-Raphson

O segundo método é o chamado método de **Newton-Raphson** (Th.III.O) baseado no método de Newton-Raphson para a solução de equações não lineares.

Esse método é um método de aplicação mais geral e muito seguro para a maioria dos problemas. Ele pode ser utilizado para grandes deformações e rotações; no entanto, conforme especificado, a limitação de pequenos esforços ainda é aplicável.

Matematicamente, o método é baseado em um aumento gradual (etapa por etapa) da carga. Esse método incremental é ilustrado no seguinte diagrama:



Nessa figura é utilizada a rigidez tangencial K_T . O símbolo u ilustra os deslocamentos e F a força matriz.

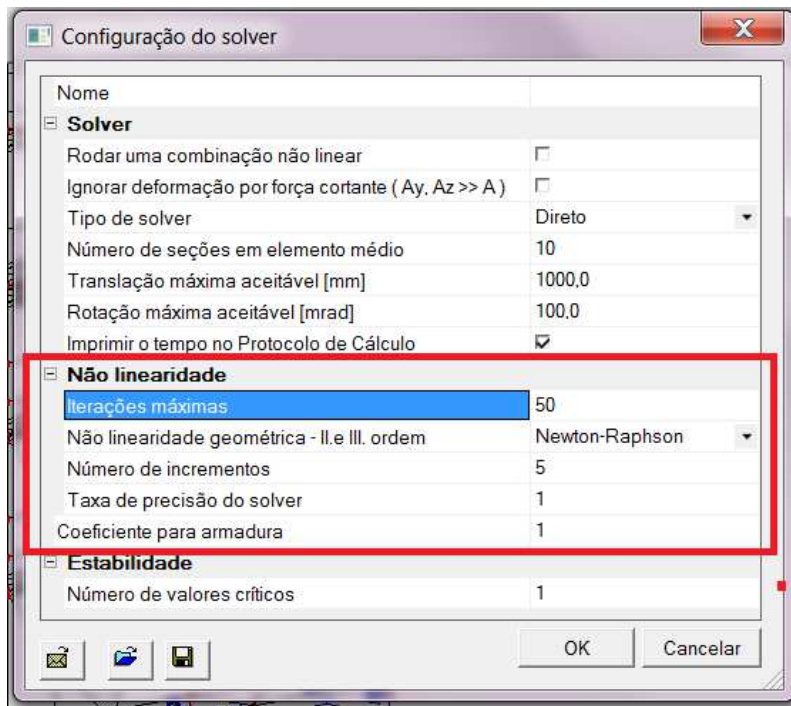
O método original de Newton-Raphson muda a rigidez tangencial em cada iteração. Há também procedimentos adaptados que mantêm a rigidez constante em certas zonas durante, por exemplo, um incremento. O SCIA ENGINEER utiliza o método original.

Como limitação, a rotação alcançada em um incremento não deve exceder 5°.

A precisão do método pode ser aumentada por meio do refinamento da malha dos elementos finitos e aumentando o número de incrementos. Por valor padrão, quando o método de Newton-Raphson for utilizado, o número de **elementos 1D** é ajustado em **4** e o **Número de incrementos** é ajustado em **5**.

Em alguns casos um alto número de incrementos pode até solucionar problemas que tendem a ter uma única solução, o que é típico para a análise de estados pós-críticos. No entanto, na maioria dos casos, esses estados são caracterizados por deformações extremas, o que não é interessante para finalidades de projeto.

A escolha do Método de Newton -Raphson, a quantidade de incrementos e a quantidade máxima de iterações podem ser especificadas por meio da função **Cálculo, Malha > Confiurações do Solver**.



Conforme especificado, o método Newton-Raphson pode ser aplicado em praticamente todos os casos. No entanto, pode falhar nas proximidades dos pontos de inflexão do diagrama de carregamento. Para evitar essa ocorrência o SCIA Engineer implementou um método específico: O método **Newton-Raphson Modificado**.

Esse método segue os mesmos princípios que método padrão mas refinará automaticamente o número de incrementos ao alcançar um ponto crítico. Esse método é utilizado para o cálculo de Estabilidade Não Linear e será examinado no Capítulo 7.

Em geral, para um cálculo primário o método de Timoshenko é utilizado uma vez que disponibiliza uma solução mais rápida que o Newton-Raphson devido ao fato de que o Timoshenko não utiliza incrementos. Quando o método Timoshenko não chega a uma solução então o método de Newton-Raphson pode ser aplicado.

Estabilidade

Estabilidade Linear

Durante um cálculo de estabilidade linear, as seguintes condições são assumidas:

- Linearidade física.
- Os elementos são considerados como idealmente retilíneos e sem nenhuma imperfeição.
- As cargas são conduzidas aos nós da malha, dessa forma é obrigatório refinar a malha de elementos finitos para se obter resultados precisos.
- O carregamento é estático.
- O coeficiente de carga crítica é, por modo, o mesmo para toda a estrutura.

Entre os nós da malha, as forças axiais e os momentos são considerados como constantes.

A equação de equilíbrio pode ser formulada da seguinte forma:

$$[K_E - K_G] \cdot u = F$$

O símbolo **u** ilustra os deslocamentos e **F** a força matriz.

Conforme especificado na teoria do método de Timoshenko, a rigidez **K** é dividida em rigidez elástica **K_E** e rigidez geométrica **K_G**. A rigidez geométrica reflete o efeito das forças axiais em vigas e lajes.

Assume-se basicamente que os elementos da matriz **K_G** sejam funções lineares das forças axiais nos elementos. Isso significa que a matriz **K_G** correspondente a λ^{th} múltiplo das forças axiais na estrutura é λ^{th} múltiplo da matriz original **K_G**.

O objetivo do cálculo de flambagem é o de encontrar um múltiplo de λ para o qual a estrutura perde estabilidade. Esse estado ocorre quando a seguinte equação tem uma solução diferente de zero:

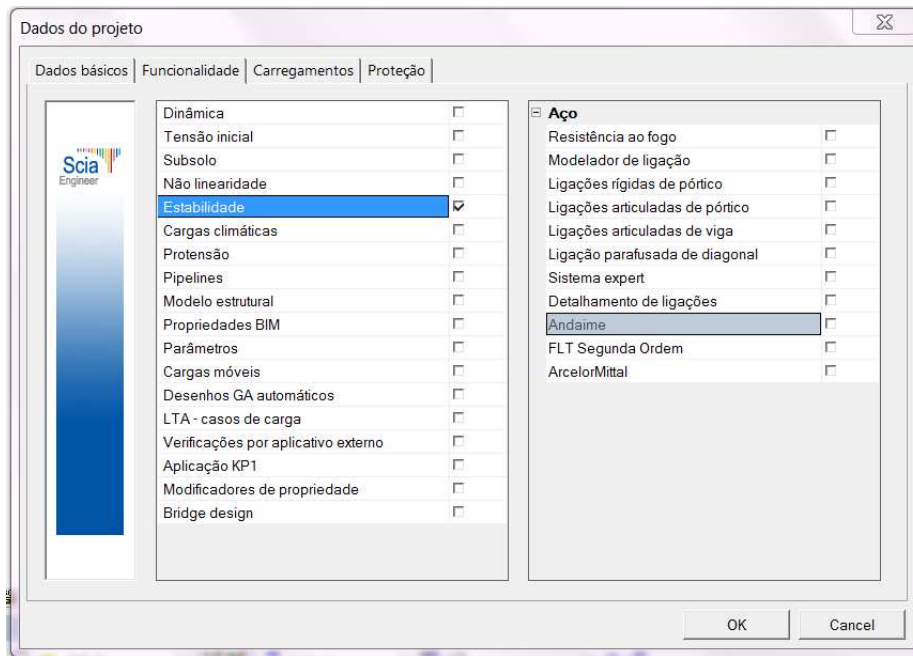
$$[K_E - \lambda \cdot K_G] \cdot u = 0$$

Isto é, deve ser encontrado um valor de λ para o qual o determinante de toda a matriz de rigidez seja igual a zero:


$$K_E - \lambda \cdot K_G = 0$$

De forma similar à análise de vibração natural o método de iteração por subespaços é utilizado para solucionar esse problema de modo natural. Quanto à análise dinâmica, o resultado é uma série de **coeficientes de carga crítica λ** com os modos naturais correspondentes.

Para executar um cálculo de Estabilidade a funcionalidade **Stability** (estabilidade) deve estar ativada.



No menu de resultados os valores de λ podem ser encontrados sob a legenda

 Critical load coefficients (coeficientes de carga crítica).

O número de coeficientes críticos a ser calculados por combinação de estabilidade pode ser especificado por meio da função **Configurações > Solver**

Observação:

- O primeiro modo natural é normalmente o mais importante e corresponde ao mais baixo coeficiente de carga crítica. Normalmente ocorre um possível colapso da estrutura com a utilização desse primeiro modo.

- A estrutura passa a ser instável para a combinação selecionada quando o carregamento alcança um valor igual ao do carregamento atual multiplicado pelo fator de carga crítica.

- Um fator de carga crítica menor que 1 significa que a estrutura está instável para a carga aplicada.

- Uma vez que o cálculo procura por modos naturais próximos de zero, os valores calculados de λ podem ser positivos ou negativos.

Um fator de carga crítica significa uma carga de tração. Dessa forma, o carregamento deve ser invertido para que ocorra a flambagem (o que pode, por exemplo, ser o caso de cargas de vento).

- Os modos de eigen (perfis de flambagem) são adimensionais. Somente os valores relativos das deformações são importantes, os valores absolutos não têm significado.

- Para elementos de carcaça a força axial não é considerada em apenas uma direção. O elemento de carcaça pode estar sob compressão em uma direção e simultaneamente sob tração na direção perpendicular. Consequentemente, o elemento tende a flambar em uma direção, porém, sendo enrijecido na outra direção. Esse é o motivo para a existência de uma capacidade de suporte pós-crítica significativa de tais estruturas.

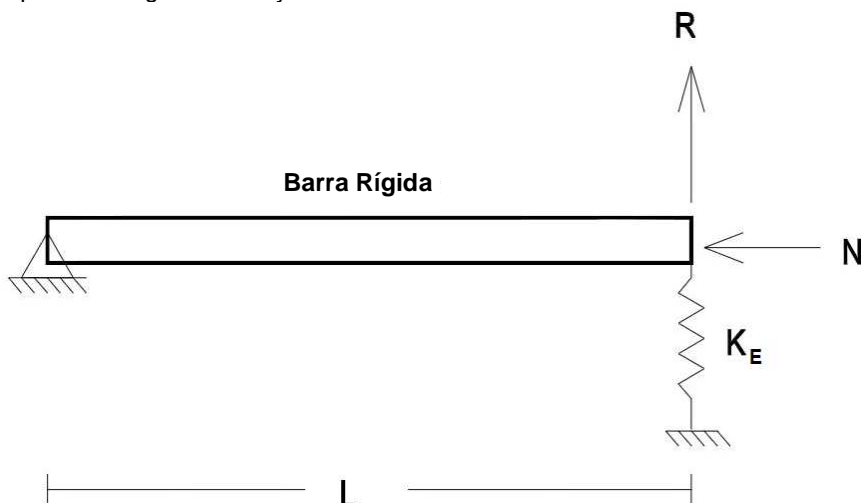
- Os Esforços Iniciais são os únicos esforços locais não lineares considerados em um Cálculo de Estabilidade Linear.

- É importante lembrar que o Cálculo de Instabilidade examina somente o comportamento teórico da flambagem da estrutura. Portanto, é ainda necessário executar a Verificação do Código de Aço para considerar a Flambagem Torcional Lateral, Verificações de Seções, Força Axial e Momentos Combinados,...

Cálculo manual de K_G

O princípio do cálculo de estabilidade e o significado da matriz K_G serão explicados com um simples exemplo

Suponha a seguinte situação:



Essa viga com um comprimento em L tem um apoio fixo por pino do lado esquerdo um apoio flexível por mola do lado direito com rigidez K_E .

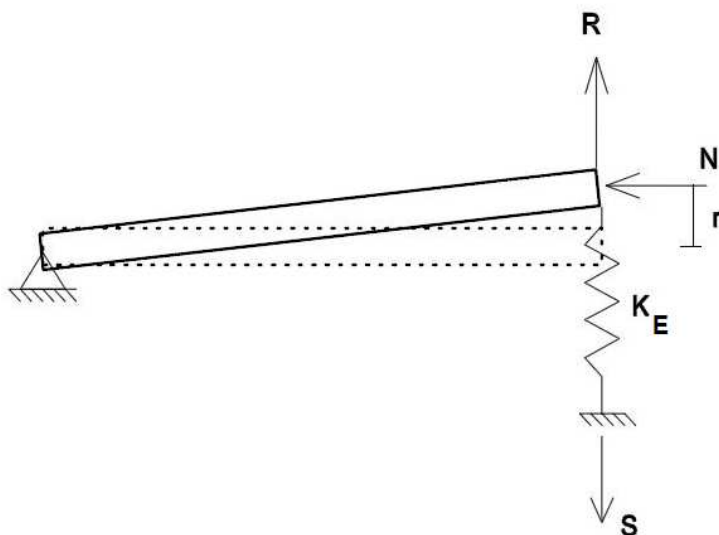
Cargas de dois pontos consideradas na viga: Uma vertical R e uma força de compressão N .

A análise padrão indica que R e N são independentes (na configuração sem deformação), sendo a correlação de rigidez:

$$K_E \cdot r = R$$

Onde r é a translação vertical do ponto direito da viga.

Mas, se a estrutura for permitida a deformar, nós podemos calcular o equilíbrio na configuração deformada, conforme mostrado abaixo:



A somatória dos momentos entorno da extremidade fixa por pino é a seguinte:

$$R \cdot L + N \cdot r = S \cdot L$$

A equação para a reação da mola é: $K_E \cdot r = S$

Substituindo S, temos:

$$R \cdot L + N \cdot r = (K_E \cdot r) \cdot L$$

Dividindo por L:

$$R + \frac{N}{L} \cdot r = K_E \cdot r$$

E agrupando os termos temos:

$$R = \left(K_E - \frac{N}{L} \right) \cdot r$$

Isso ainda pode ser reformulado se definirmos a rigidez geométrica da seguinte forma:

$$K_G = \frac{N}{L}$$

tendo a forma final como:

$$R = (K_E - K_G) \cdot r$$

de: $[K_E - K_G] \cdot u = F$

Quando a força normal **N** for multiplicada por um fator α_{cr} de modo que a rigidez total seja zero:

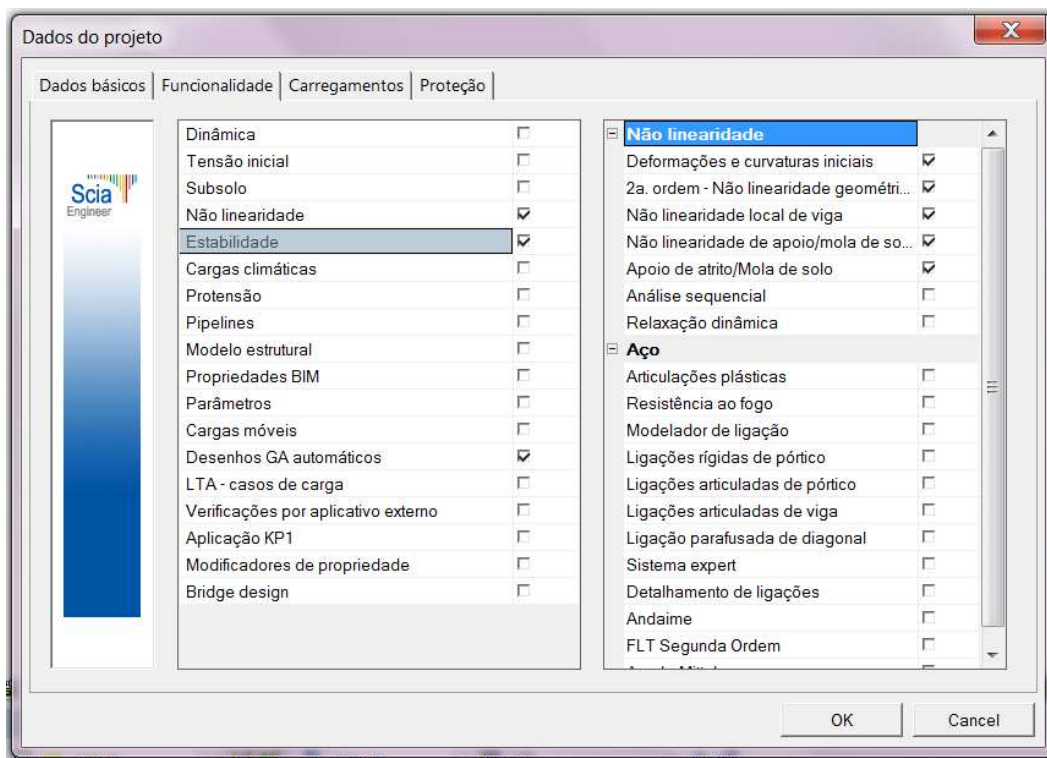
$$K_E - \frac{\alpha_{cr} \cdot N}{L} = 0$$

A estrutura flambará e se tornará "instável".

Forma de Flambagem

Como uma alternativa para as imperfeições Globais e Locais, temos no parágrafo **13: Combinações não lineares** que permitem a utilização de uma forma de flambagem como uma única imperfeição.

Para considerar imperfeições geométricas, a funcionalidade **Não Linearidade > Deformação e curvatura inicial e Estabilidade** deve ser ativada.



O cálculo da forma de flambagem por meio de um cálculo de estabilidade será examinado no Capítulo 7.

Uma vez que a forma de flambagem é adimensional, o eurocódigo disponibiliza a fórmula para calcular a amplitude η_{init} da imperfeição. A Ref.[29] mostra exemplos que ilustram esse método. Nessa referência a amplitude é dada da seguinte forma:

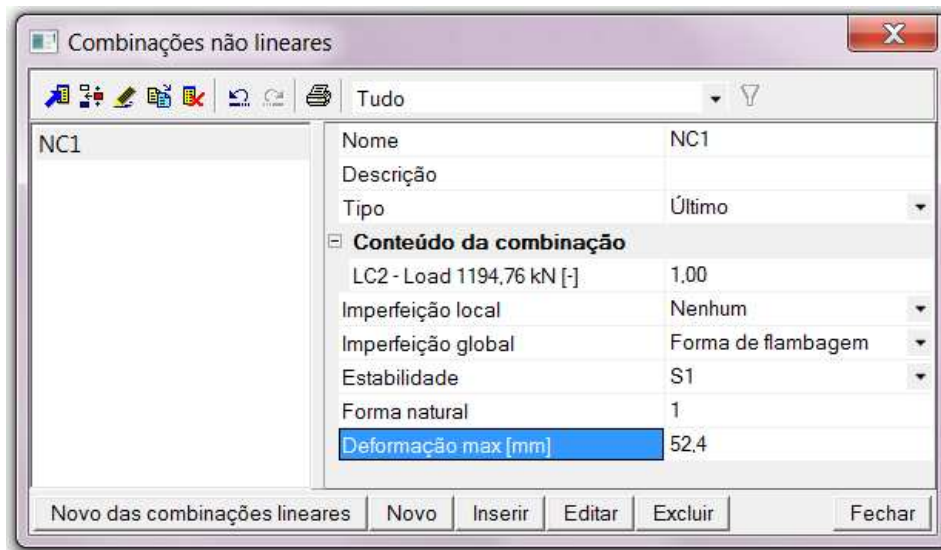
$$\eta_{init} = e_0 \cdot \frac{N_{cr}}{E \cdot I_y \cdot \eta_{cr,max}''} \cdot \eta_{cr}$$

$$e_0 = \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \cdot \frac{1 - \chi \cdot (\bar{\lambda})^2}{1 - \chi \cdot (\bar{\lambda})^2} \quad \text{para} \quad \bar{\lambda} > 0,2$$

$$\text{Onde:} \quad \bar{\lambda} = \sqrt{N_{Rk} / N_{cr}}$$

- α = O fator de imperfeição para a curva de flambagem relevante.
- χ = O fator de redução para a curva de flambagem relevante, dependendo da seção transversal relevante.
- N_{Rk} = A resistência característica da força normal da seção transversal, ou seja $N_{pl,Rk}$.
- N_{cr} = Carga de flambagem crítica elástica.
- M_{Rk} = A resistência característica do momento da seção transversal crítica, ou seja, $M_{el,Rk}$ ou $M_{el,Rk}$ de acordo com a relevância.
- η_{cr} = Forma do modo de flambagem crítica elástica.
- $\eta_{cr,max}''$ = Segunda derivada máxima do modo de flambagem crítica elástica.

O valor de η_{init} pode então ser inserido no campo **Deformação máxima**.

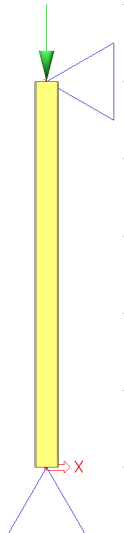


➤ Exemplo de Stability_Imperfection.esa

No Capítulo 6, foi abordada a utilização da forma de flambagem como imperfeição de acordo com a EC3. Nesse exemplo, o procedimento é ilustrado para uma coluna.

A coluna tem um seção transversal **IPE 300**, fabricada com aço **S235** e com as seguinte propriedades importantes:

$$\begin{array}{lll}
 E = 210,000 \text{ N/mm}^2 & f_y = 235 \text{ N/mm}^2 & \gamma_{M1} = 1,00 \\
 L = 5000 \text{ mm} & A = 5380 \text{ mm}^2 & \\
 I_y = 83560000 \text{ mm}^4 & W_{pl,y} = 628400 \text{ mm}^3 &
 \end{array}$$



Cálculo do formato de flambagem

Primeiro é feito um **Cálculo de estabilidade** utilizando uma carga de 1kN. Dessa forma, obtêm a carga de flambagem crítica elástica N_{cr} . Para se obter resultados precisos, o **Número de elementos 1D** é ajustado em **10**. Além disso, a **Deformação pela Força Cortante** é desconsiderada, e, assim sendo, o resultado pode ver verificado por um cálculo manual.

O cálculo da estabilidade fornece o seguinte resultado:

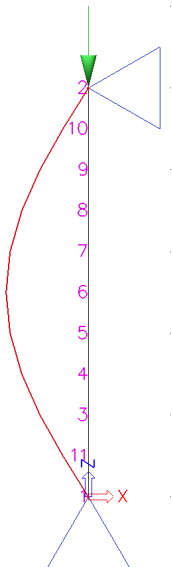
Coeficientes de carga crítica

Coeficientes de carga crítica	
N	f
-	□
Combinação de estabilidade: S1	
1	6885.28

Isso pode ser verificado com a Fórmula de Euler utilizando o comprimento do elemento como o comprimento de flambagem:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210.000 \frac{N}{mm^2} \cdot 83560000 mm^4}{(5000 mm)^2} = 6927,51 \text{ kN}$$

A figura abaixo mostra os nós da malha da coluna e o formato correspondente da flambagem:



Deslocamento de nós

Cálculo de estabilidade, Extremo: Não.

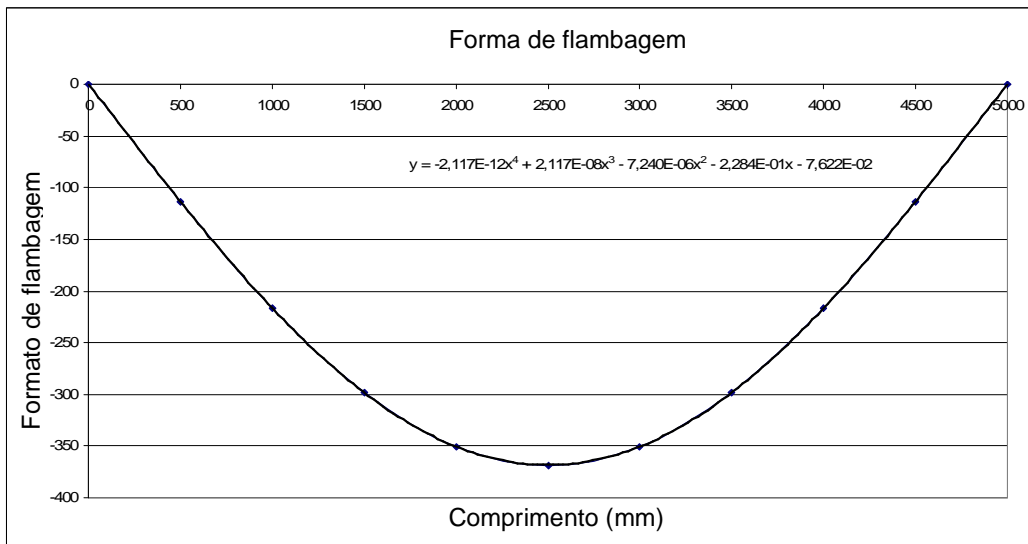
Seleção: Todos

Combinações de estabilidade: S1/1 - 6885,28

Valores multiplicados por 10000 para melhor representação numérica

Nó da malha	caso	Ux [-]	Uz [-]	Fiy [-]
1	S1/1 - 6885.28	0.00	0.00	2314.62
11	S1/1 - 6885.28	1138.38	0.00	2201.33
3	S1/1 - 6885.28	2165.34	0.00	1872.57
4	S1/1 - 6885.28	2980.33	0.00	1360.50
5	S1/1 - 6885.28	3503.59	0.00	715.26
6	S1/1 - 6885.28	3683.89	0.00	0.00
7	S1/1 - 6885.28	3503.59	0.00	-715.26
8	S1/1 - 6885.28	2980.33	0.00	-1360.50
9	S1/1 - 6885.28	2165.34	0.00	-1872.57
10	S1/1 - 6885.28	1138.38	0.00	-2201.33
2	S1/1 - 6885.28	0.00	0.00	-2314.62

Utilizando, por exemplo, uma planilha Excel a forma da flambagem pode ser aproximado a uma função polinomial do 4^o grau.



A função polinomial apresenta a vantagem da segunda derivada poder ser facilmente calculada.

$$\Rightarrow \eta_{cr} = -2,117E^{-12} x^4 + 2,117E^{-8} x^3 - 7,240E^{-6} x^2 - 2,284E^{-1} x - 7,622E^{-2}$$

$$\Rightarrow \eta_{cr,max}'' = -2,540E^{-11} x^2 + 1,270E^{-7} x - 1,448E^{-5}$$

Cálculo de e_0

$$N_{Rk} = f_y \times A = 235 \frac{N}{mm^2} \times 5380mm^2 = 6927,51 \text{ kN}$$

$$M_{Rk} = f_y \times W_{pl} = 235 \frac{N}{mm^2} \times 628400mm^3 = 147674000 \text{ Nmm (classe 2)}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1264300N}{6885280N}} = 0,43$$

$\alpha = 0,21$ para a curva de flambagem a

$$\chi = \frac{1}{0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + (\bar{\lambda})^2] + \sqrt{(0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + (\bar{\lambda})^2])^2 - (\bar{\lambda})^2}} = 0,945$$

Esses resultados intermediários podem ser verificados pelo SCIA Engineer quando da verificação do da coluna pela norma de aço:

Parâmetros de Flambagem	yy
Deslocabilidade	deslocável
Sistema de Comprimento L	5,000
Coefficiente de flambagem k	1,00
Comprimento de flambagem Lcr	5,000
Carga Crítica de Euler Ncr	6927,51
Esbeltez	40,12
Esbeltez Relativa Lambda	0,43
Limite de Esbeltez Lambda,0	0,20
Curva de Flambagem	a
Imperfeição Alfa	0,21
Fator de Redução Chi	0,95
Resistência a Flambagem Nb,Rd	1195,37

$$\Rightarrow e_0 = \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \cdot \frac{1 - \chi \cdot (\bar{\lambda})^2}{1 - \chi \cdot (\bar{\lambda})^2} = 0,21 \cdot (0,43 - 0,2) \cdot \frac{147674000 \text{ Nmm}}{1264300 \text{ N}}$$

$$= \mathbf{5,605 \text{ mm}}$$

Os parâmetros necessários foram calculados de modo a possibilitar que na etapa final a amplitude da imperfeição possa ser determinada.

Cálculo de η_{init}

A seção intermediária da coluna é decisiva $\Rightarrow x = 2500$

$$\eta_{cr} \text{ no centro da seção} = -368,24$$

$$\eta_{cr, \max}'' \text{ no centro da seção} = 1,443 \text{E}^{-04} \text{ 1/mm}^2$$

$$\Rightarrow \eta_{init} = e_0 \cdot \frac{N_{cr}}{E \cdot I_y \cdot \eta_{cr, \max}''} \cdot \eta_{cr}$$

$$= 5,605 \text{ mm} \cdot \frac{6885280 \text{ N}}{210000 \text{ N/mm}^2 \cdot 83560000 \text{ mm}^4 \cdot 1,443 \text{E}^{-4} \text{ 1/mm}^2} \cdot 368,24$$

$$= \mathbf{5,615 \text{ mm}}$$

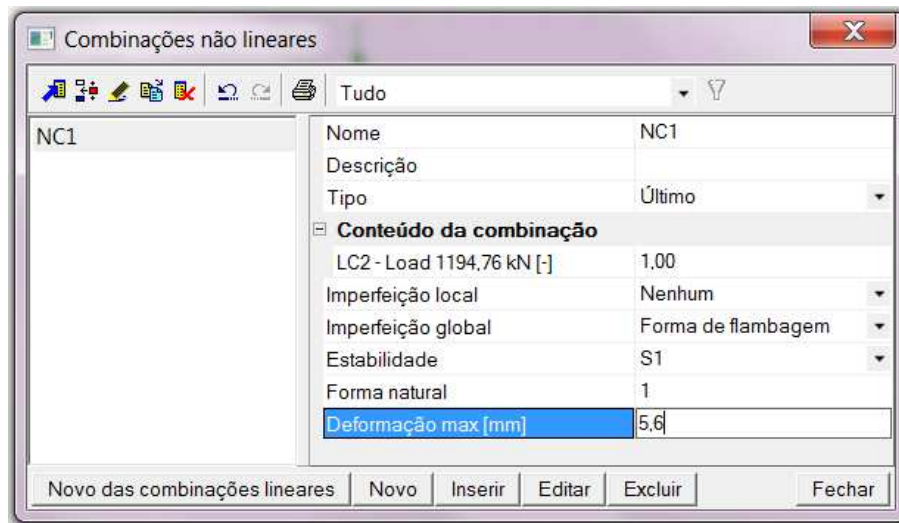
Esse valor pode então ser considerado com a amplitude da forma de flambagem para a imperfeição.

Para ilustrar o demonstrado acima a coluna é carregada por uma carga de compressão igual a sua resistência à flambagem.

No entanto, devido à imperfeição, um momento adicional ocorrerá e influenciará a verificação da seção. A resistência à flambagem pode ser calculada da seguinte forma:

$$N_{Ed} = N_{b, Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 0,945 \cdot 5380 \text{ mm}^2 \cdot 235 \text{ N/mm}^2 = \mathbf{1194,76 \text{ kN}}$$

É criada uma combinação não linear na qual é especificado a forma de flambagem como a imperfeição.



Ao utilizar essa combinação, é feito um cálculo não linear de 2ª Ordem utilizando o **Método de Timoshenko**.

O momento adicional pode ser facilmente calculado da seguinte forma:

$$M_{\eta,init} = N_{Ed} \cdot \eta_{init} \cdot \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}}} = 1194,76kN \cdot 5,615mm \cdot \frac{1}{1 - \frac{1194,76kN}{6885,28kN}}$$

$$= 8,12 \text{ kNm}$$

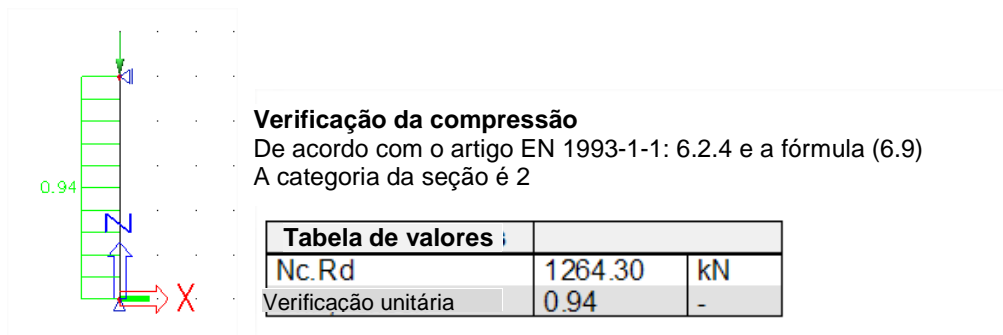
Ao executar uma Verificação de Código do Aço na coluna para a combinação não linear, isso pode ser verificado. A verificação crítica é executada a **2,5m** e apresenta os seguintes efeitos:

A verificação crítica é na posição 2,500 m

Forças internas		
NEd	-1194.76	kN
Vy,Ed	0.00	kN
Vz,Ed	0.66	kN
TEd	0.00	kNm
My,Ed	8.10	kNm
Mz,Ed	0.00	kNm

Portanto, o momento adicional corresponde ao momento calculado pelo SCIA Engineer.

Conforme visto no diagrama, o **Caminho 3** é o seguinte: O formato de flambagem atua como uma única imperfeição global e local. Isso implica no fato de que somente uma verificação da seção e a Flambagem Lateral por Torção precisam ser verificadas. Uma vez que a Flambagem Lateral por Torção (FLT) é desprezível com esse momento fletor pequeno, somente a verificação da seção é necessária:



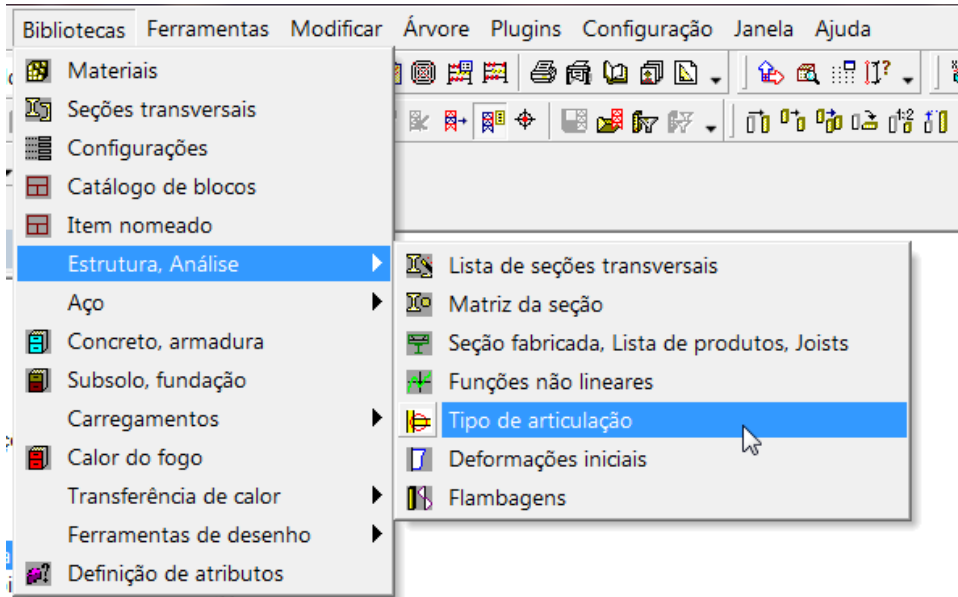
Esse exemplo ilustra a utilização de uma forma de flambagem como imperfeição. Dependendo da geometria da estrutura, essa imperfeição pode exercer uma grande influência nos resultados devido a ocorrência de momentos adicionais.

Ao utilizar esse método é muito importante verificar duas vezes todas as etapas aplicadas: Pequenas alterações no carregamento ou na geometria necessitam de um novo cálculo do formato de flambagem e amplitude antes de executar uma análise não linear.

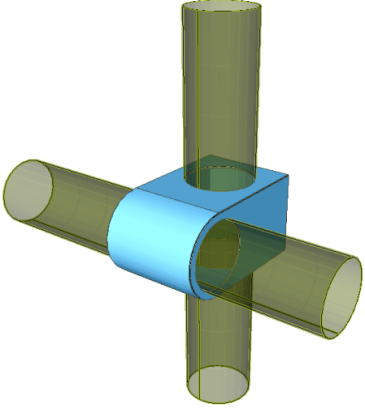
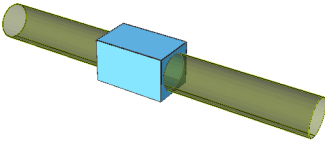
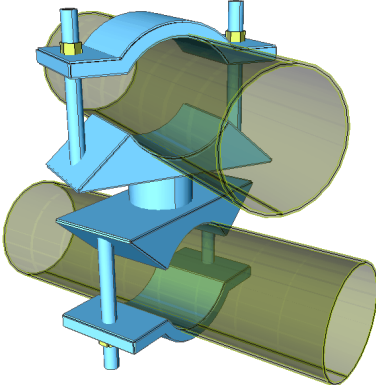
Como uma observação final: A forma de flambagem somente disponibiliza informações sobre uma região específica da estrutura. A imperfeição é aplicada à região em questão e os resultados/verificações são significativos para essa região em questão apenas. Outras combinações de cargas levarão a outras formas de flambagem, portanto, para cada combinação de carga deve ser atribuída uma forma de flambagem específica e a verificação da norma de aço só deve ser utilizada para os elementos para os quais a imperfeição é aplicável. Uma vez que a forma de flambagem corresponde a um modo global, o colapso desses elementos levará a um colapso total da estrutura.

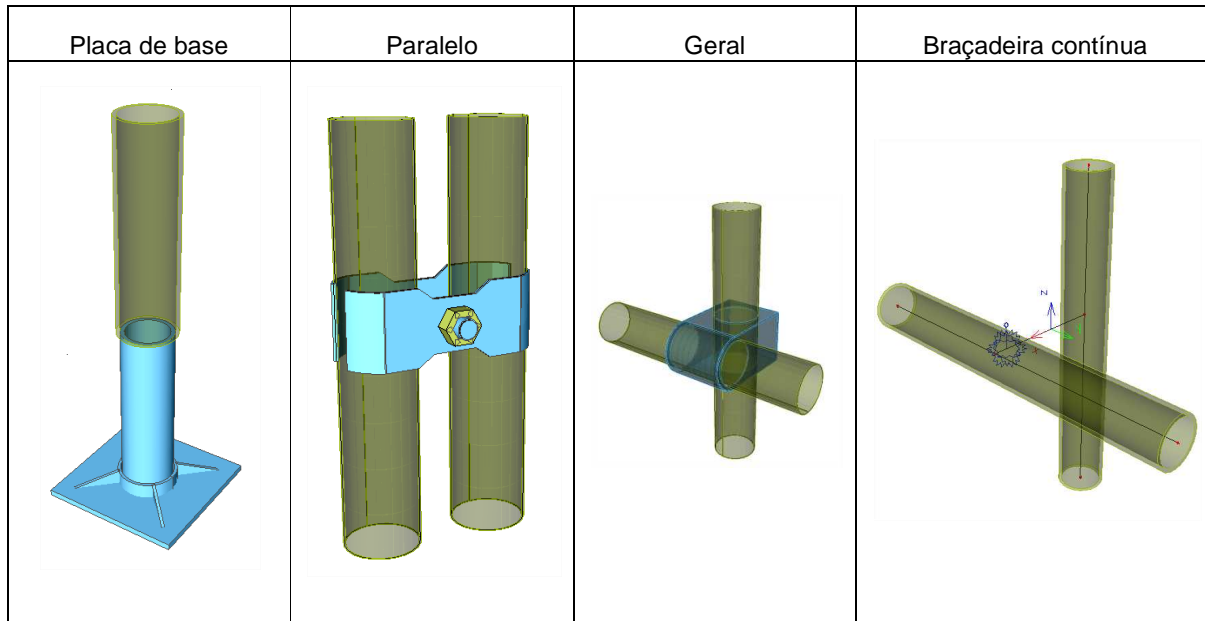
Tipos de articulação e rigidez não linear

Para ligações em uma estrutura de andaime uma verificação deve ser executada nas forças normais, forças cortantes e momentos fletores. Diversos tipos de ligações são consideradas pelo SCIA Engineer. Para obter informações sobre diferentes ligações, vá para a “Bibliotecas -> Estrutura, análise -> Tipo de Articulação”.

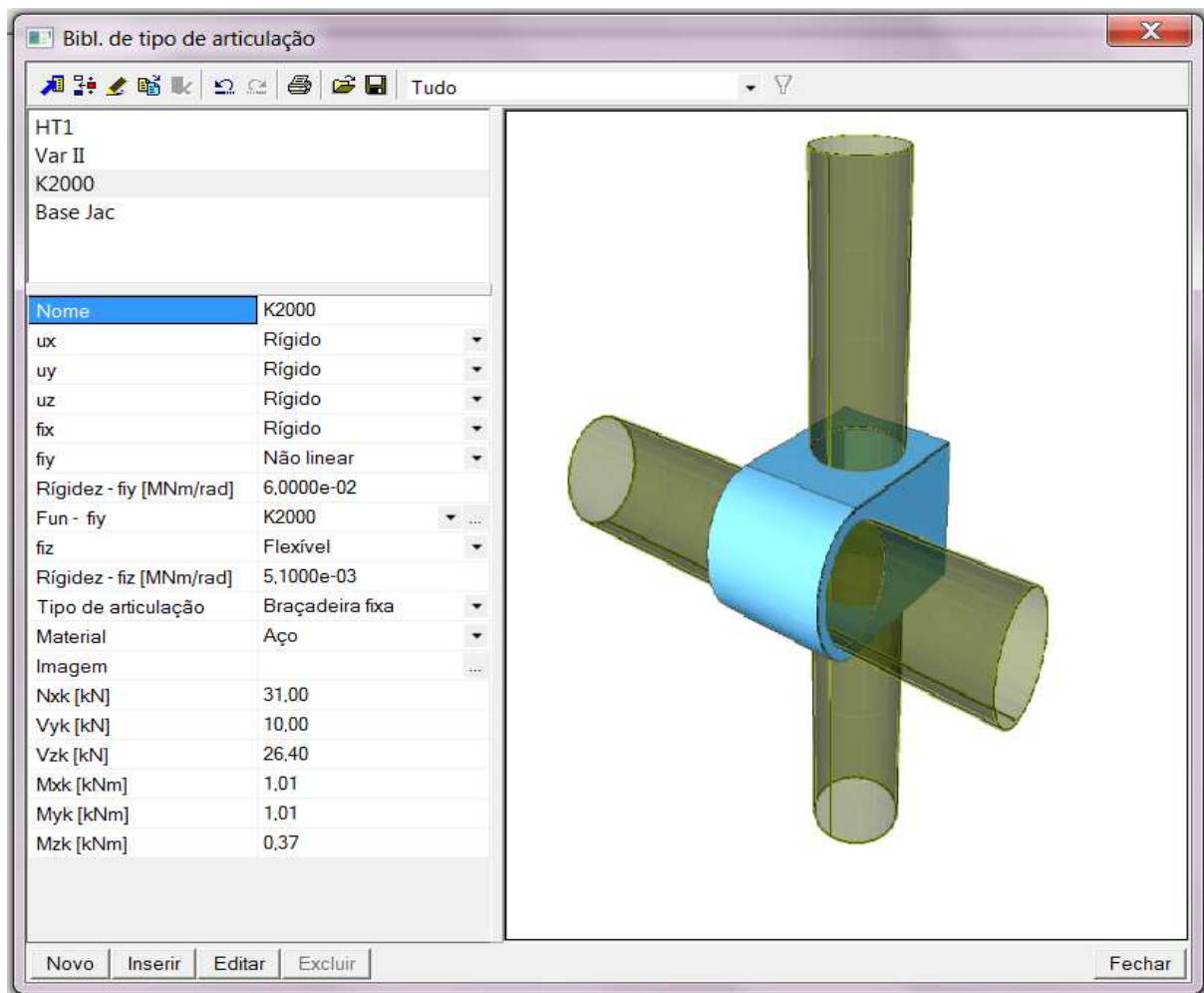


Nessa “Biblioteca de tipo de articulação” você pode escolher os seguintes tipos por meio da opção “Tipo de Articulação”:

Braçadeira fixa	Luva	Braçadeira giratória
 <p>A 3D model showing a blue fixed bracket connecting two intersecting pipes. The bracket is a solid, U-shaped component that fits around the pipes, preventing any rotation.</p>	 <p>A 3D model showing a blue sleeve joint connecting two pipes. The sleeve is a rectangular block that fits over the pipes, allowing them to slide through it.</p>	 <p>A 3D model showing a blue rotating bracket connecting two pipes. The bracket is a complex, multi-part assembly that allows the pipes to rotate relative to each other.</p>



Nessa ligação, não apenas as rigidezes são consideradas de forma flexível ou não linear, mas especificamente para essas ligações as máximas forças permitidas também podem ser consideradas, conforme exibidas abaixo para braçadeiras fixas:



As rigidezes são preenchidas e as forças máximas precisam ser obtidas a partir das informações das ligações apresentadas pelo fornecedor.

Ligações entre o Guarda Corpo/Travessa e Montante

Nesse exemplo foi adotada a ligação de Layher (K2000):



Para essa ligação, aconselha-se considerar uma ligação geral contendo as propriedades de Zulassung Z-8.22-64. Para esse fim, os seguintes esforços máximos são previstos:

$$M_{y,R,d} = 101 \text{ kNcm} (=1,01 \text{ kNm})$$

$$M_{z,R,d} = 37 \text{ kNcm} (=0,37 \text{ kNm})$$

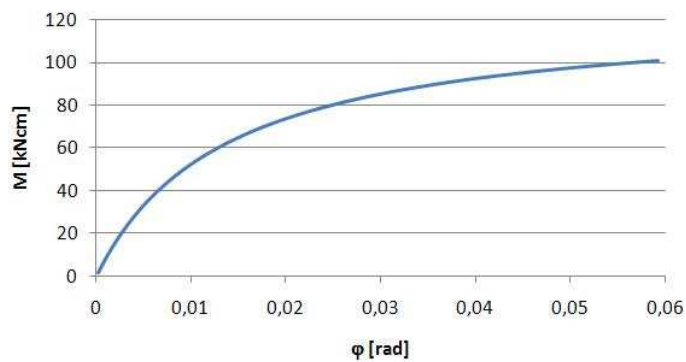
$$V_{y,R,d} = 10 \text{ kN}$$

$$V_{z,R,d} = 26,4 \text{ kN}$$

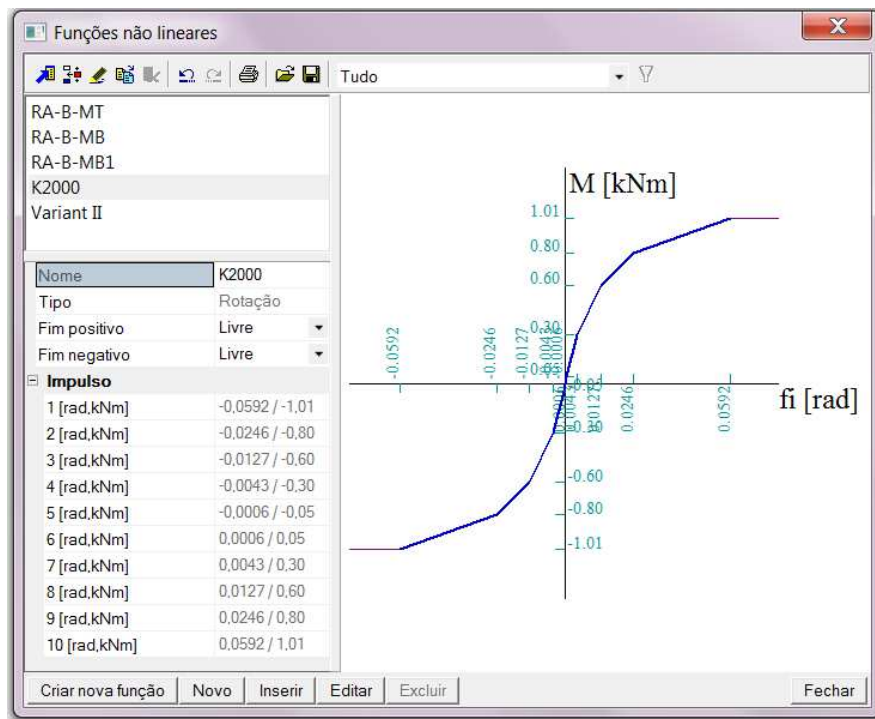
$$N_{D,R,d} = 31 \text{ kN}$$

$$\varphi_d [\text{radial}] = M/(9140 - 73,6M)$$

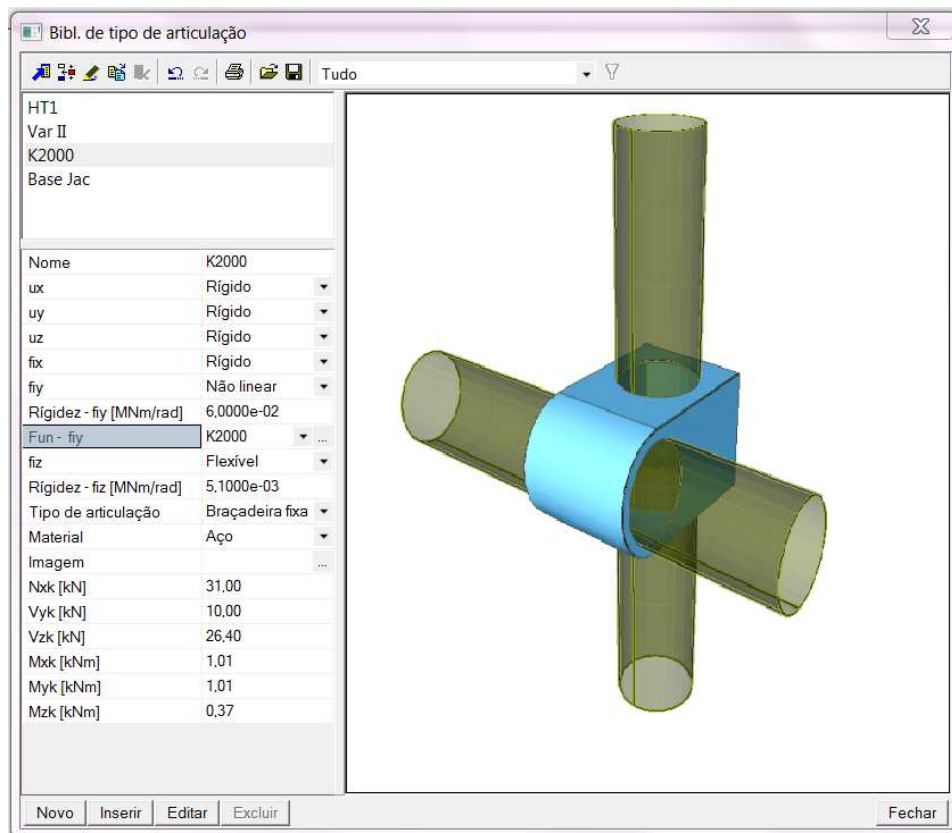
Com a equação de rotação acima é possível construir a seguinte curva de rotação:



Para considerar esses dados corretamente o cálculo deve ser executado utilizando uma mola não linear ou uma função não linear pelo SCIA Engineer:



Se todos os dados forem preenchidos para essa articulação, aparecerá a seguinte janela:



Supõe-se que as translações são “rígidas” em todas as direções. Além disso, a rotação no eixo x é considerada “fixa”. Trata-se apenas de uma estimativa aproximada. Para a rotação em torno do eixo y a função não linear (determinada anteriormente) é considerada com uma rigidez linear de 0,051 MNm/rad. A rotação em torno do eixo local z será bem menor que em torno do eixo y, ou seja, 0,0051 MNm/rad.

Para os valores de V_{yk} , adota-se o mesmo valor considerado para V_{yz} . Esse valor deve ser determinado pelo fornecedor também.

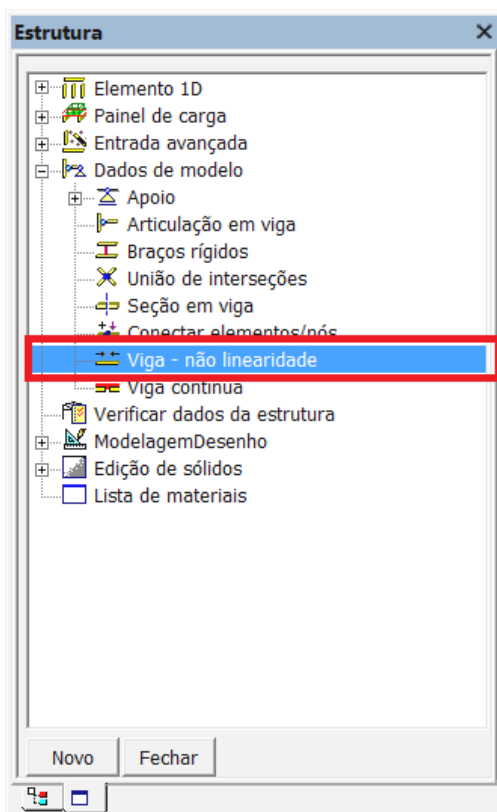
Para a obtenção dos valores dos momentos máximos deve-se assumir a mesma conclusão.

Subsequentemente, essas articulações atribuídas a ambas as extremidades das travessas e guarda corpo.

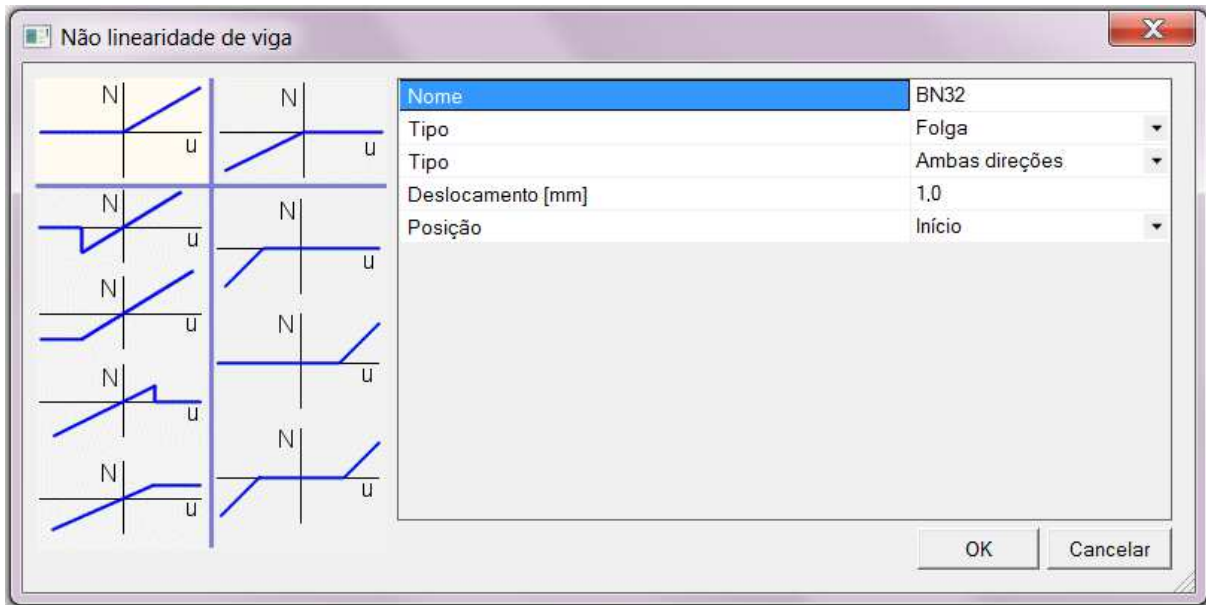
Ligação entre contraventamentos e colunas

Para a ligação entre os contraventamentos e as colunas, a rotação em torno do eixo y é livre. Pode haver uma discussão sobre a rigidez em torno do eixo z. Nesse exemplo, o ajuste está em “rígido” apesar de não poder ser completamente considerado como “rígido”. Se desejar considerar o valor exato, será necessário questionar seu fornecedor. A rotação em torno do eixo x e as translações nas direções x, y e z são “rígidas”.

Na direção do elemento (local x direção) há uma certa margem para esses contraventamentos de vento. Esse valor pode ser considerado adotando espaçamentos. Para esta finalidade todos os contraventamentos são considerados não lineares nos elementos, contendo este tipo de espaçamento.



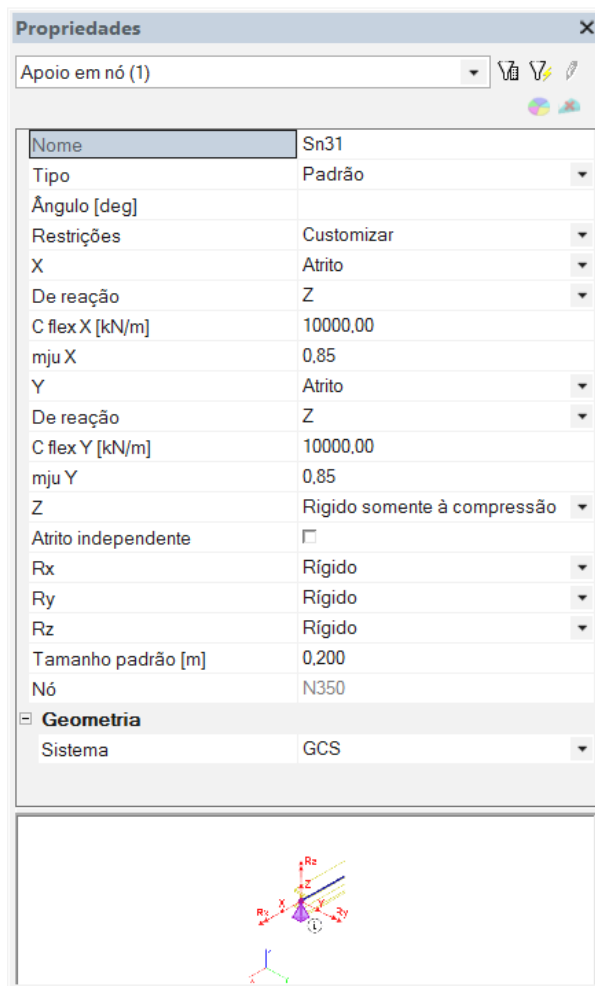
Subsequentemente é considerada uma margem de 1 mm por elemento.



Apoios

Além disso, é melhor considerar os apoios como não lineares. Na direção vertical esses apoios somente recebem compressão e não tração. Esse valor é considerado na direção z com rigidez apenas à compressão. As rotações são consideradas livres em todas as direções.

Para os graus de liberdade conforme os deslocamentos x e y deve-se aplicar a norma da EN12812;2003, Anexo B. Nesse caso são inseridos coeficientes de atrito entre diversos materiais. Suponhamos que o andaime esteja apoiado em madeira, é possível notar nessa norma que os coeficientes máximos e mínimos de atrito entre a madeira e o aço são de 1,2 e 0,5. É adotado um valor médio de 0,85. Esse valor é também inserido no SCIA Engineer.



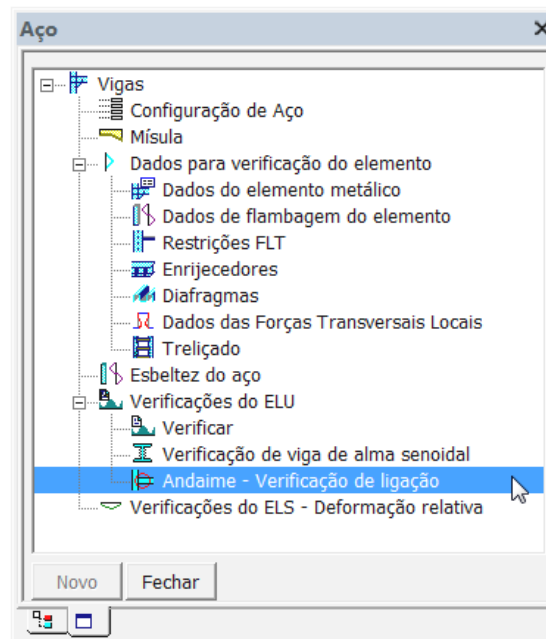
Para “C flex” considera-se um valor maior. Isso corresponde uma alta rigidez do apoio nas direções x e y antes do atrito ser excedido.

Andaime – Verificação de Ligação

Ao verificar os esforços admissíveis recomenda-se visualizar os resultados por tipo de perfil (montantes, contraventamentos,...). Os esforços máximos podem, nesse ponto, ser comparados com os valores permissíveis do fornecedor. Além disso, as placas de base são verificadas com esse valor.

Para as forças de ancoragem, a força de reação pode ser comparada à força permissível de uma braçadeira perpendicular. Por outro lado, a ancoragem também pode ser verificada manualmente por meio do efeito da combinação das forças de tração e cortante.

Para as ligações essa verificação pode ser executada pelo próprio SCIA Engineer itself, com a opção “Aço - > Andaime – Verificação de ligação”.

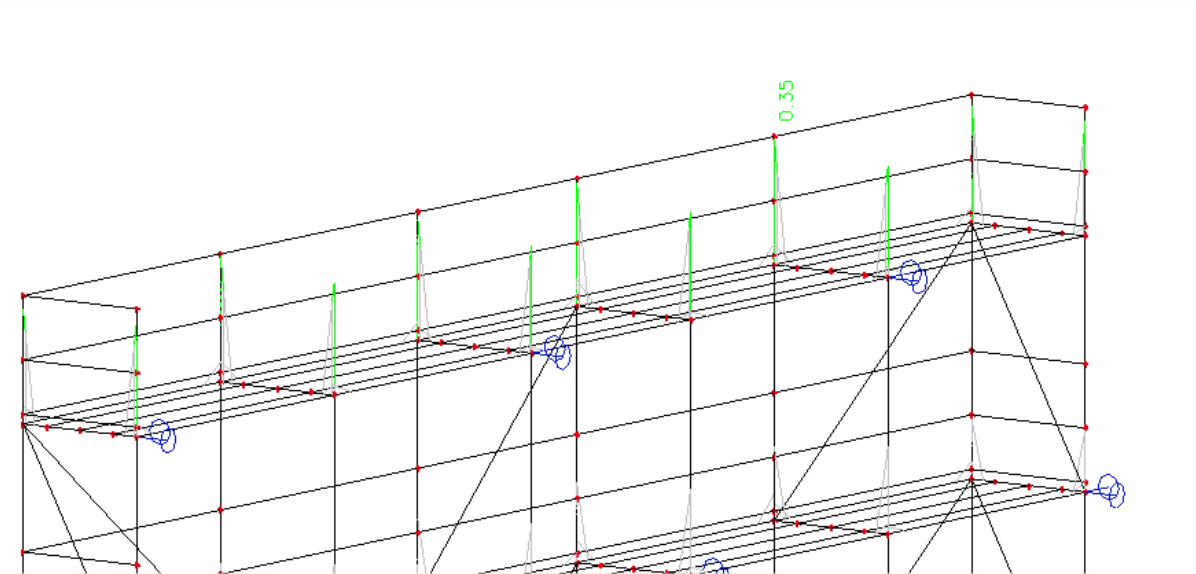


Essa verificação executa uma verificação unitária das braçadeiras que já contêm uma rigidez atribuída.

➤ Exemplo

Scaffolding.esa

- Selecione a função “Andaime – Verificação de ligação” no menu de aço.
 - Analise a verificação da viga B350: uma verificação unitária de 0,35.
- Os valores dessa verificação são exibidos abaixo.



Andaime – verificação de ligação

Cálculo linear, Extremo: Global

Seleção: Todos

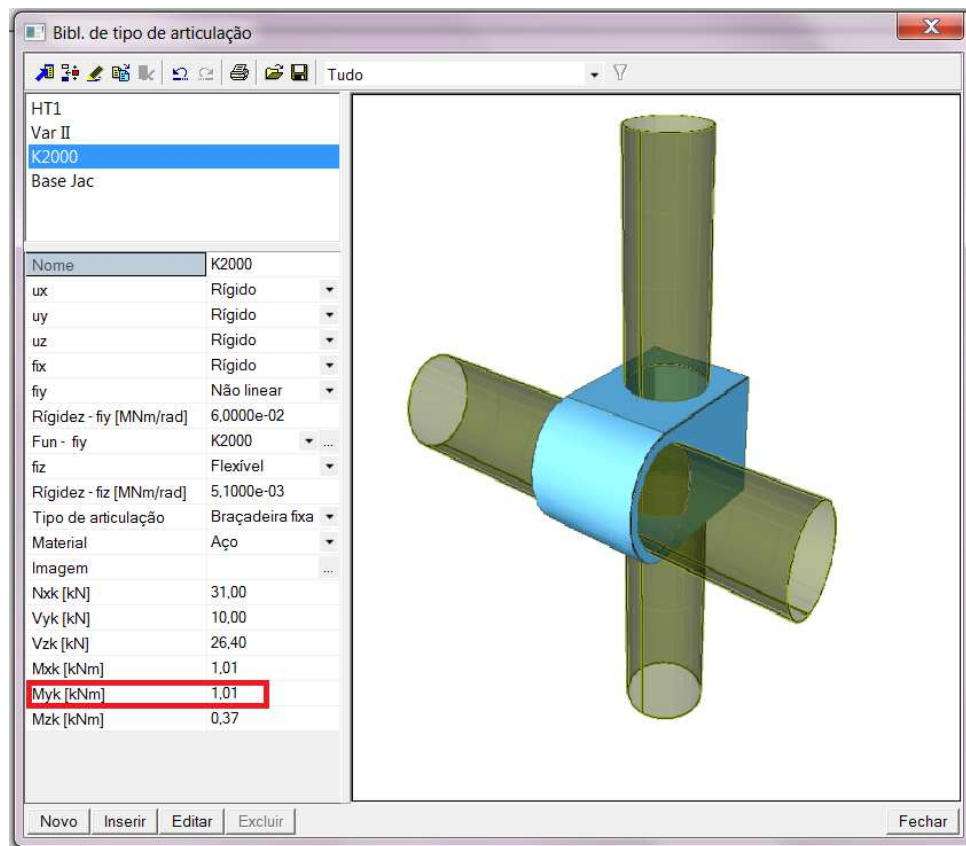
Categoria: Alle UGT

Seção Transversal: Travessa – RO48,3x3,2

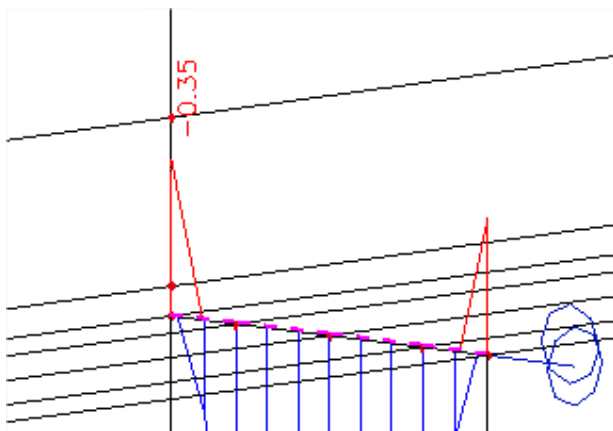
Verificação da braçadeira

Nome	Condição	Verificação unitária – Max	Verificação unitária - Fx [-]	Verificação unitária Fy [-]	Verificação unitária Fz [-]	Verificação unitária Mx [-]	Verificação unitária -My [-]	Verificação unitária -Mz [-]	Verificação unitária Interação n [-]
K2000	Alle UGT	0.35	0.02	0.04	0.16	0.00	0.35	0.01	0.26

A braçadeira atinge um valor de 0.35 para a verificação unitária de My. A força máxima My para essa ligação é 1,01 kNm.



A força interna My para essa viga e para a categoria “Alle UGT” é -0,35 kNm:



Se forem divididas uma pela outra, obteremos uma verificação unitária de 0,35 (= 0,35/1,01).

Verificação Não Linear do Andaime

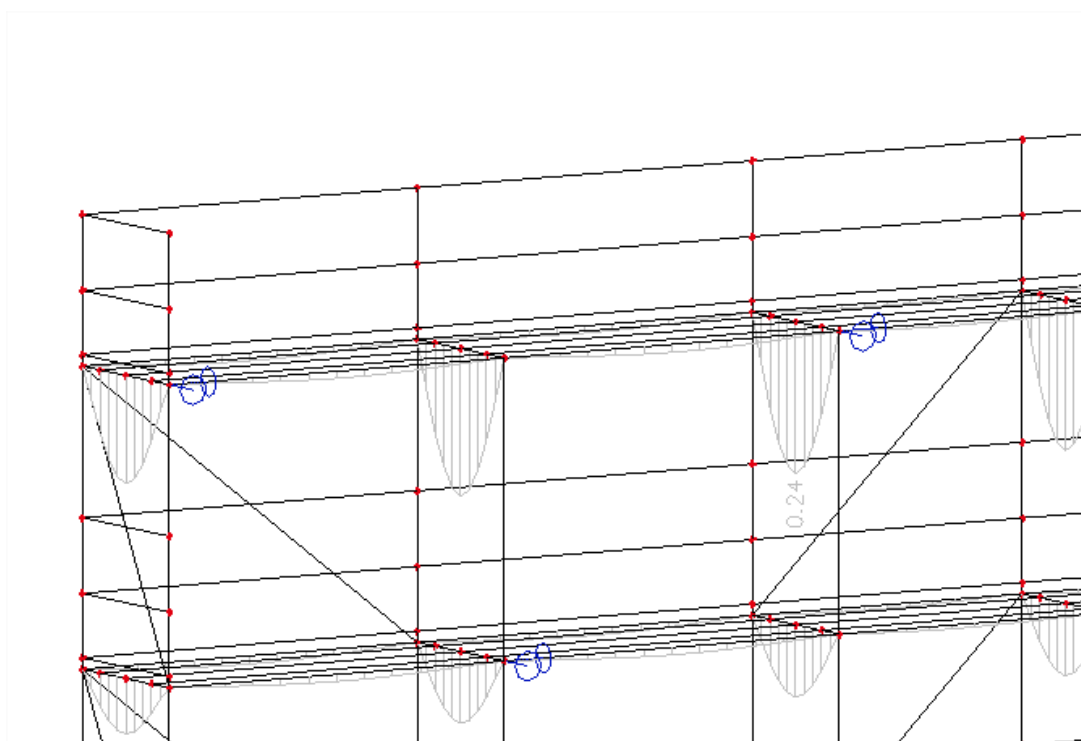
Os resultados da verificação de ULS e SLS são repetidos nesse capítulo, mas agora para combinações não lineares e com a rigidez correta para as ligações.

➤ Exemplo de verificação de SLS

Scaffolding.esa

- Seleção de "Deformação Relativa" no menu de aço.
- A verificação máxima será executada para a viga B352: uma verificação unitária de 0,24.

Os valores dessa verificação são exibidos abaixo.



Deformação relativa

Cálculo não linear, Extremo: Global, sistema: Principal
 Seleção: Todas
 Categoria: NL BGT
 Seção Transversal: Travessa – RO48,3x3,2

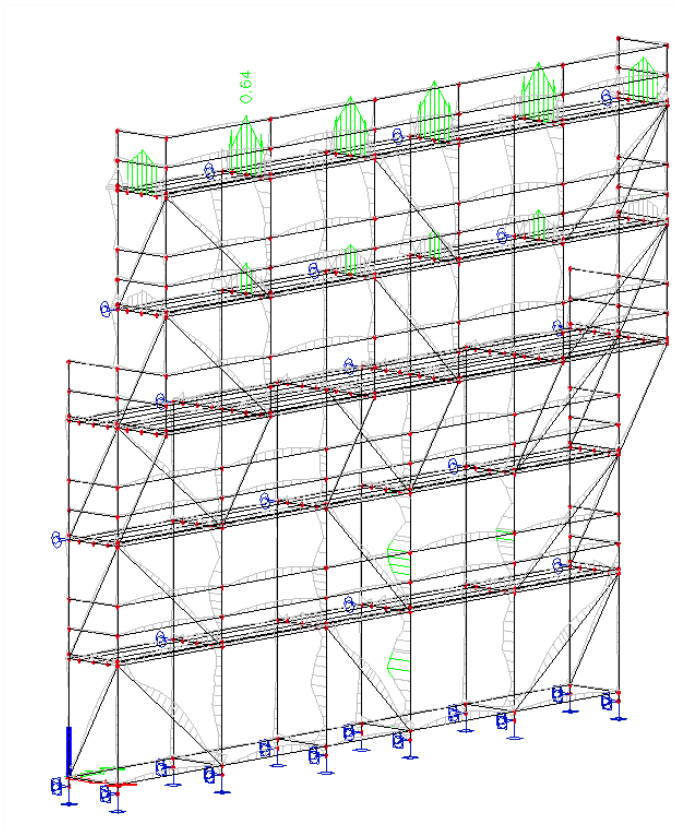
Condição - combinação	Elemento	dx [m]	uy [mm]	Rel uy [1/xx]	Verif. uy [-]	uz [mm]	Rel uz [1/xx]	Verif. uz [-]
SLS 2	B43	1.285	-3.2	1/795	0.13	-0.3	1/8782	0.01
SLS 1	B43	1.285	3.3	1/782	0.13	-0.3	1/9070	0.01
SLS 3	B352	0.545	0.0	1/10000	0.00	-2.6	1/415	0.24
SLS 4	B9	0.818	0.0	1/10000	0.00	0.1	1/10000	0.01

➤ Exemplo de verificação ULS (estado limite de serviço) – Verificação do andaime

Scaffolding.esa

- Selecione a função “Verificação do sistema de andaimes” na verificação da norma de aço.
- A verificação máxima será executada para a viga B350: uma verificação unitária de 0,66.

Os valores dessa verificação são exibidos abaixo.



A verificação crítica é na posição 0,545 m

Forças internas		
NEd	-1.25	kN
Vy.Ed	0.01	kN
Vz.Ed	1.55	kN
TEd	0.00	kNm
My.Ed	0.90	kNm
Mz.Ed	0.00	kNm

Verificação do andaime
De acordo com a DIN4420:1, art. 5.4.7.4 e Tabela 7

Tabela de valores		
Npl.d	106.46	kN
Vpl.d	39.13	kN
Mpl.d	1.41	kNm
Verificação unit.	0.64	-

Alumínio – não incluído no pacote

Tipos de alumínio

Os valores característicos das propriedades dos materiais são baseados na Tabela 3.2a para ligas de alumínio acabadas to tipo chapas, tiras e placas e na Tabela 3.2b para ligas de alumínio acabadas do tipo perfil extrudado, tubo extrudado, barra extrudada e tubo estirado.

EN 1999-1-1: 2007 (E)

Tabela 3.2a. Valores característicos de 0,2% de limite de elasticidade f_o , estado limite último f_u (sem soldagem e para HAZ) alongamento mínimo A, fatores de redução $\rho_{o,haz}$ e $\rho_{u,haz}$ em HAZ, categoria de flambagem e expoente n_p para ligas de alumínio acabadas – Chapas, tiras e placas.

Alloy EN- AW	Temper ¹⁾	Thick- ness mm ¹⁾	f_o ¹⁾	f_u	A_{50} ¹⁾⁶⁾	$f_{o,haz}$ ²⁾	$f_{u,haz}$ ²⁾	HAZ-factor ²⁾		BC ⁴⁾	n_p ^{1), 5)}						
			N/mm ²		%	N/mm ²		$\rho_{o,haz}$ ¹⁾	$\rho_{u,haz}$								
3004	H14 H24/H34	≤ 6 3	180 170	220	1 3	75	155	0,42 0,44	0,70	B	23 18						
	H16 H26/H36	≤ 4 3	200 190	240	1 3			0,38 0,39	0,65	B	25 20						
3005	H14 H24	≤ 6 3	150 130	170	1 4	56	115	0,37 0,43	0,68	B	38 18						
	H16 H26	≤ 4 3	175 160	195	1 3			0,32 0,35	0,59	B	43 24						
3103	H14 H24	≤ 25 12,5	120 110	140	2 4	44	90	0,37 0,40	0,64	B	31 20						
	H16 H26	≤ 4	145 135	160	1 2			0,30 0,33	0,56	B	48 28						
5005/ 5005A	O/H111	≤ 50	35	100	15	35	100	1	1	B	5						
	H12 H22/H32	≤ 12,5	95 80	125	2 4	44	100	0,46 0,55	0,80	B	18 11						
	H14 H24/H34	≤ 12,5	120 110	145	2 3			0,37 0,40	0,69	B	25 17						
5052	H12 H22/H32	≤ 40	160 130	210	4 5	80	170	0,50 0,62	0,81	B	17 10						
	H14 H24/H34	≤ 25	180 150	230	3 4			0,44 0,53	0,74	B	19 11						
5049	O / H111	≤ 100	80	190	12	80	190	1	1	B	6						
	H14 H24/H34	≤ 25	190 160	240	3 6	100	190	0,53 0,63	0,79	B	20 12						
5454	O/H111	≤ 80	85	215	12	85	215	1	1	B	5						
	H14 H24/H34	≤ 25	220 200	270	2 4	105	215	0,48 0,53	0,80	B	22 15						
5754	O/H111	≤ 100	80	190	12	80	190	1	1	B	6						
	H14 H24/H34	≤ 25	190 160	240	3 6	100	190	0,53 0,63	0,79	B	20 12						
5083	O/H111	≤ 50	125	275	11	125	275	1	1	B	6						
		50 < t ≤ 80	115	270	14 ³⁾	115	270										
	H12 H22/H32	≤ 40	250 215	305	3 5	155	275	0,62 0,72	0,90	B	22 14						
H14 H24/H34	≤ 25	280 250	340	2 4	0,55 0,62			0,81	A	22 14							
6061	T4 / T451	≤ 12,5	110	205	12	95	150	0,86	0,73	B	8						
	T6 / T651	≤ 12,5	240	290	6	115	175	0,48	0,60	A	23						
	T651	12,5 < t ≤ 80	240	290	6 ³⁾												
6082	T4 / T451	≤ 12,5	110	205	12	100	160	0,91	0,78	B	8						
	T61/T6151	≤ 12,5	205	280	10							125	185	0,61	0,66	A	15
	T6151	12,5 < t ≤ 100	200	275	12 ³⁾									0,63	0,67	A	14
	T6/T651	≤ 6	260	310	6									0,48	0,60	A	25
		6 < t ≤ 12,5	255	300	9									0,49	0,62	A	27
	T651	12,5 < t ≤ 100	240	295	7 ³⁾									0,52	0,63	A	21
7020	T6	≤ 12,5	280	350	7	205	280	0,73	0,80	A	19						
	T651	≤ 40										9 ³⁾					
8011A	H14 H24	≤ 12,5	110 100	125	2 3	37	85	0,34 0,37	0,68	B	37 22						
	H16 H26	≤ 4	130 120	145	1 2			0,28 0,31	0,59		33 33						

1) Se forem especificados duas (três) têmperas em uma linha, as têmperas separadas por " | " têm valores tecnológicos diferentes mas separadas por " / " possuem os mesmos valores. (as têmperas mostram diferenças para f_o , A e n_p).

2) Os valores HAZ são válidos para soldagem MIG com espessura de até 15 mm. Para soldagem TIG e ligas de encruamento (3xxx, 5xxx e 8011A) aplicam-se os mesmos valores até 6 mm de espessura, mas para soldagem TIG e ligas endurecíveis por precipitação (6xxx e 7xxx) e com de até 6 mm de espessura, os valores HAZ precisam ser multiplicados por um fator de 0,8m assim como os fatores ρ . Para espessuras superiores – a não ser que existam outros dados disponíveis – os valores HAZ e fatores ρ precisam ser reduzidos ainda mais por um fator de 0,8 para as ligas endurecíveis por precipitação (6xxx e 7xxx) e por um fator de 0,9 para ligas de encruamento (3xxx, 5xxx e 8011A). Essas reduções não se aplicam à tempera O.

3) Com base em A (= $A_{5,65}V_{A_0}$), não A_{50} .

4) BC = Categoria de flambagem, veja o item 6.1.4.4, 6.1.5 e 6.3.1.

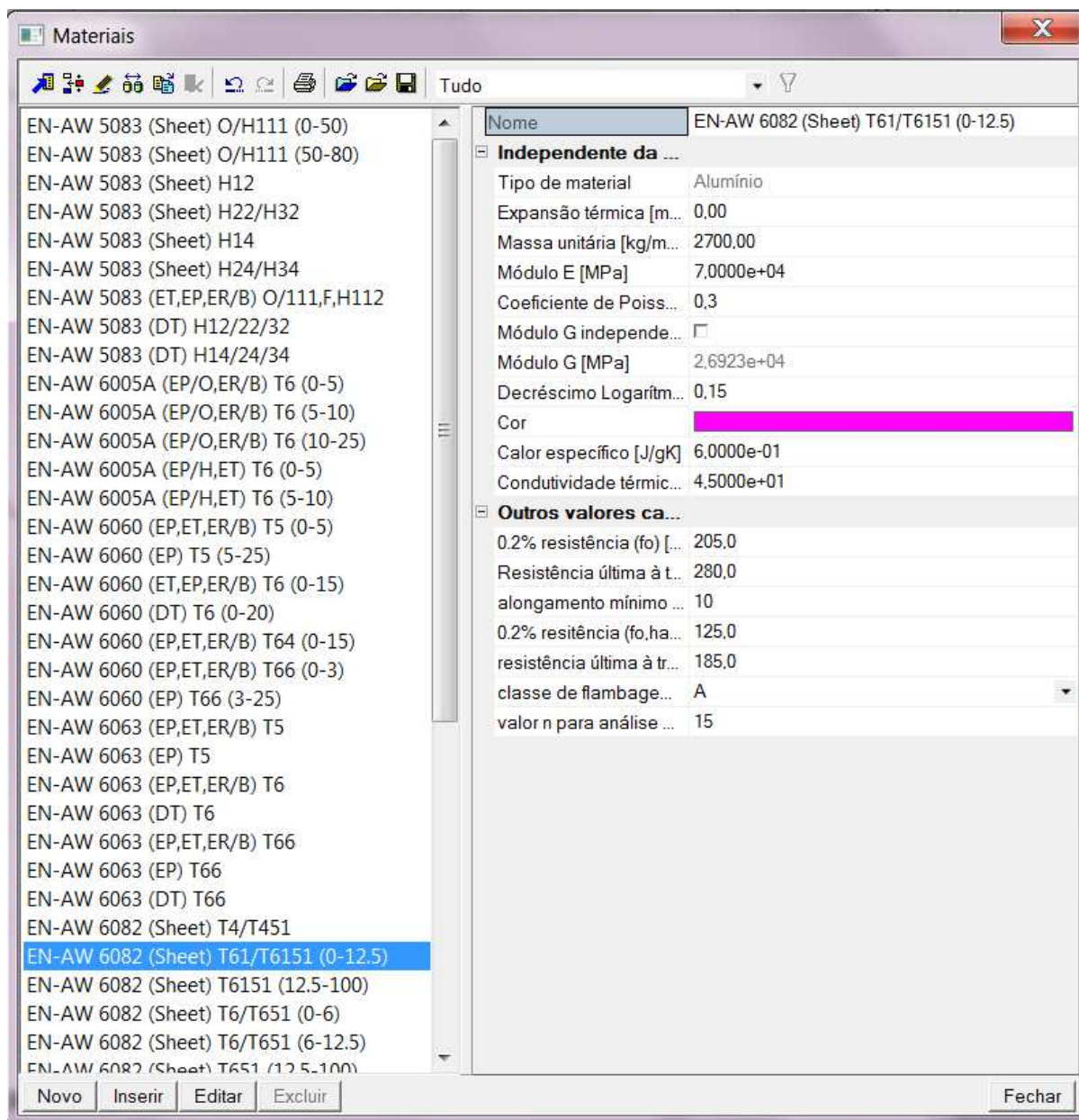
5) Valor n na expressão Ramberg-Osgood para análise plástica. É aplicável somente em ligação com o valor f_o .

6) Os valores mínimos de alongamento indicados não são aplicáveis a toda a faixa de espessura apresentada, mas principalmente aos materiais mais finos. Para obter informações mais detalhadas, consulte a EN 485-2.

Tabela 3.2b. Valores característicos de 0,2% de limite de elasticidade f_o , estado limite último f_u (sem soldagem e para HAZ) alongamento mínimo A , fatores de redução $\rho_{o,haz}$ e $\rho_{u,haz}$ em HAZ, categoria de flambagem e expoente n_p para ligas de alumínio acabadas – Perfis extrudados, tubo extrudado, barra extrudada e tubo estirado.

Alloy EN-AW	Product form	Temper	Thick-ness t mm 1) 3)	f_o 1)	f_u 1)	A 5) 2)	$f_{o,haz}$ 4)	$f_{u,haz}$ 4)	HAZ-factor 4)		BC 6)	n_p 7)		
				N/mm ²	%	N/mm ²	$\rho_{o,haz}$	$\rho_{u,haz}$						
5083	ET, EP,ER/B	O / H111, F, H112	$t \leq 200$	110	270	12	110	270	1	1	B	5		
	DT	H12/22/32	$t \leq 10$	200	280	6	135	270	0,68	0,96	B	14		
		H14/24/34	$t \leq 5$	235	300	4			0,57	0,90	A	18		
6060	EP,ET,ER/B	T5	$t \leq 5$	120	160	8	50	80	0,42	0,50	B	17		
	EP		$5 < t \leq 25$	100	140	8			0,50	0,57	B	14		
	ET,EP,ER/B	T6	$t \leq 15$	140	170	8	60	100	0,43	0,59	A	24		
	DT		$t \leq 20$	160	215	12			0,38	0,47	A	16		
	EP,ET,ER/B	T64	$t \leq 15$	120	180	12	60	100	0,50	0,56	A	12		
	EP,ET,ER/B	T66	$t \leq 3$	160	215	8	65	110	0,41	0,51	A	16		
EP	$3 < t \leq 25$		150	195	8	0,43			0,56	A	18			
6061	EP,ET,ER/B,DT	T4	$t < 25$	110	180	50	95	150	0,86	0,83	B	8		
	EP,ET,ER/B,DT	T6	$t \leq 20$	240	260	8	115	175	0,48	0,67	A	55		
6063	EP,ET,ER/B	T5	$t \leq 3$	130	175	8	60	100	0,46	0,57	B	16		
	EP		$3 < t \leq 25$	110	160	7			0,55	0,63	B	13		
	EP,ET,ER/B	T6	$t \leq 25$	160	195	8	65	110	0,41	0,56	A	24		
	DT		$t \leq 20$	190	220	10			0,34	0,50	A	31		
	EP,ET,ER/B	T66	$t \leq 10$	200	245	8	75	130	0,38	0,53	A	22		
	EP		$10 < t \leq 25$	180	225	8			0,42	0,58	A	21		
DT	$t \leq 20$		195	230	10	0,38			0,57	A	28			
6005A	EP/O, ER/B	T6	$t \leq 5$	225	270	8	115	165	0,51	0,61	A	25		
			$5 < t \leq 10$	215	260	8			0,53	0,63	A	24		
			$10 < t \leq 25$	200	250	8			0,58	0,66	A	20		
	EP/H, ET	T6	$t \leq 5$	215	255	8			0,53	0,65	A	26		
$5 < t \leq 10$			200	250	8	0,58	0,66	A	20					
6106	EP	T6	$t \leq 10$	200	250	8	95	160	0,48	0,64	A	20		
6082	EP,ET,ER/B	T4	$t \leq 25$	110	205	14	125	185	0,91	0,78	B	8		
	EP/O, EP/H	T5	$t \leq 5$	230	270	8			125	185	0,54	0,69	B	28
	EP/O,EP/H ET	T6	$t \leq 5$	250	290	8			125	185	0,50	0,64	A	32
			$5 < t \leq 15$	260	310	10					0,48	0,60	A	25
	ER/B	T6	$t \leq 20$	250	295	8			125	185	0,50	0,63	A	27
			$20 < t \leq 150$	260	310	8					0,48	0,60	A	25
DT	T6	$t \leq 5$	255	310	8	125	185	0,49	0,60	A	22			
		$5 < t \leq 20$	240	310	10			0,52	0,60	A	17			
7020	EP,ET,ER/B	T6	$t \leq 15$	290	350	10	205	280	0,71	0,80	A	23		
	EP,ET,ER/B	T6	$15 < t < 40$	275	350	10			0,75	0,80	A	19		
	DT	T6	$t \leq 20$	280	350	10			0,73	0,80	A	18		

No SCIA Engineer, os seguintes materiais padrão são disponibilizados:



Imperfeição local inicial e_0

Os valores de e_0/L podem ser seleccionados no Anexo Nacional. Valores recomendados são apresentados na Tabela 5.1 Ref.[1]. A imperfeição local deve ser aplicada quando a força normal N_{Ed} em um elemento for superior a 25% da carga crítica de flambagem N_{cr} do elemento.

Classe de flambagem de acordo com a Tabela 3.2	Análise elástica	Análise plástica
	e_0/L	e_0/L
A	1/300	1/250
B	1/200	1/150

Onde L é o comprimento do elemento.

O SCIA Engineer pode calcular automaticamente a imperfeição local de acordo com a norma para todos os elementos em questão ou o usuário pode inserir seus próprios valores para e_0 . Isso pode ser feito por meio do menu do Anexo nacional para o Alumínio.

Forma inicial

Para uma seção transversal com o material Alumínio, a Forma Inicial pode ser definida. Para uma Seção Transversal Geral a Representação de paredes finas deve ser utilizada para possibilitar a definição do Formato Inicial.

Os tipos de partes considerados são utilizados posteriormente para determinar os fatores de categorização e redução.

As partes com seção transversal de parede fina podem ser consideradas de acordo com os seguintes tipos:

F	Parte fixa – Sem necessidade de redução
I	Parte interna da seção transversal
SO	Irradiação Simétrica
UO	Irradiação Assimétrica

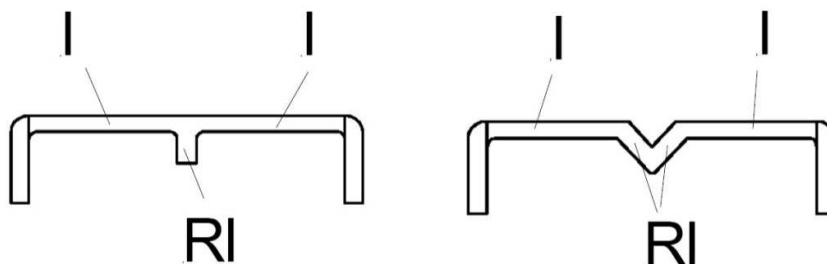
Uma parte da seção transversal também pode ser considerada como reforço:

nenhuma	Não considerada como reforço
RI	Reforçada Internamente (enrigeceador intermediário)
RUO	Reforço de Irradiação assimétrica (enrigeceador de borda)

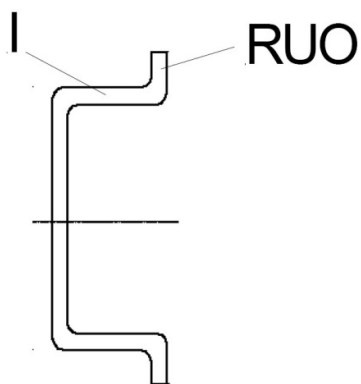
Caso uma parte for especificada como reforço, um ID de reforço pode ser inserido. As partes com o mesmo ID de reforço devem ser consideradas como igualmente reforçadas como um único reforço.

As seguintes condições são aplicáveis para a utilização do reforço:

- RI: Deve haver uma placa tipo I em ambos os lados do Reforço RI.



- RUO: O reforço é ligado a apenas uma placa com o tipo I.



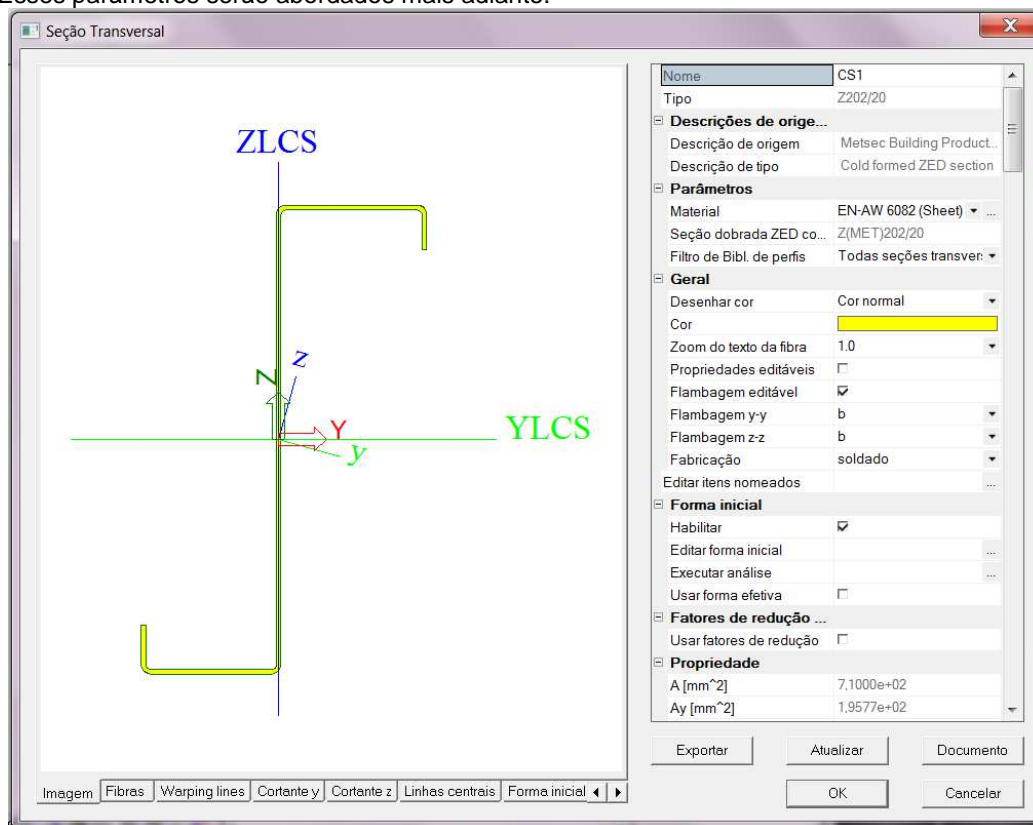
Para seções transversais do montante, o tipo padrão e o reforço podem ser obtidos na (Ref.[1]). Para seções que não sejam do montante o usuário precisa avaliar as diferentes partes na seção transversal.

O Formato Inicial pode ser considerado utilizando a função Seções Transversais > Editar > Seção Reduzida. Após isso, o usuário pode selecionar a função 'Editar Seção Reduzida. Nessa caixa de menu as soldas (HAZ – Zona Afetada pelo Calor) também pode ser selecionadas para aplicação

Os parâmetros de soldas (HAZ) são:

- ID da Placa
- Posição
- Método de Soldagem: MIG ou TIG
- Material de Soldagem: 5xxx e 6xxx ou 7xxx
- Temperatura da Solda
- Número de caminhos de calor

Esses parâmetros serão abordados mais adiante.



Forma inicial e dados HAZ

Forma

	Yc [mm]	Zc [mm]	A [mm ²]	Ybeg [mm]	Zbeg [mm]	Yend [mm]	Zend [mm]	t [mm]	Tipo placa	Tipo arm.	ID arm.
1	-58,20	-89,90	40,00	-58,20	-79,90	-58,20	-99,90	2,00	UO	RUO	0
2	-29,20	-99,95	116,00	-58,20	-99,90	-0,20	-100,00	2,00	I	nenhum	0
3	0,00	0,00	400,00	-0,20	-100,00	0,20	100,00	2,00	I	nenhum	0
4	31,70	99,95	126,00	0,20	100,00	63,20	99,90	2,00	I	nenhum	0
5	63,20	90,90	36,00	63,20	99,90	63,20	81,90	2,00	UO	RUO	0

Dados

	ID placa	Pos.tipo	Posição[m]	Posição[m]	modo de soldagem	Arrial de soldagem	temperatura	trilhas de
1	3	rela	100,00	0,50	MIG	6xxx lig	90,00	3
*	1	abso	0,00	0,00	MIG	3xxx all	60,00	3

Desenho

OK Cancelar

Verificação da seção

Fatores de segurança parciais

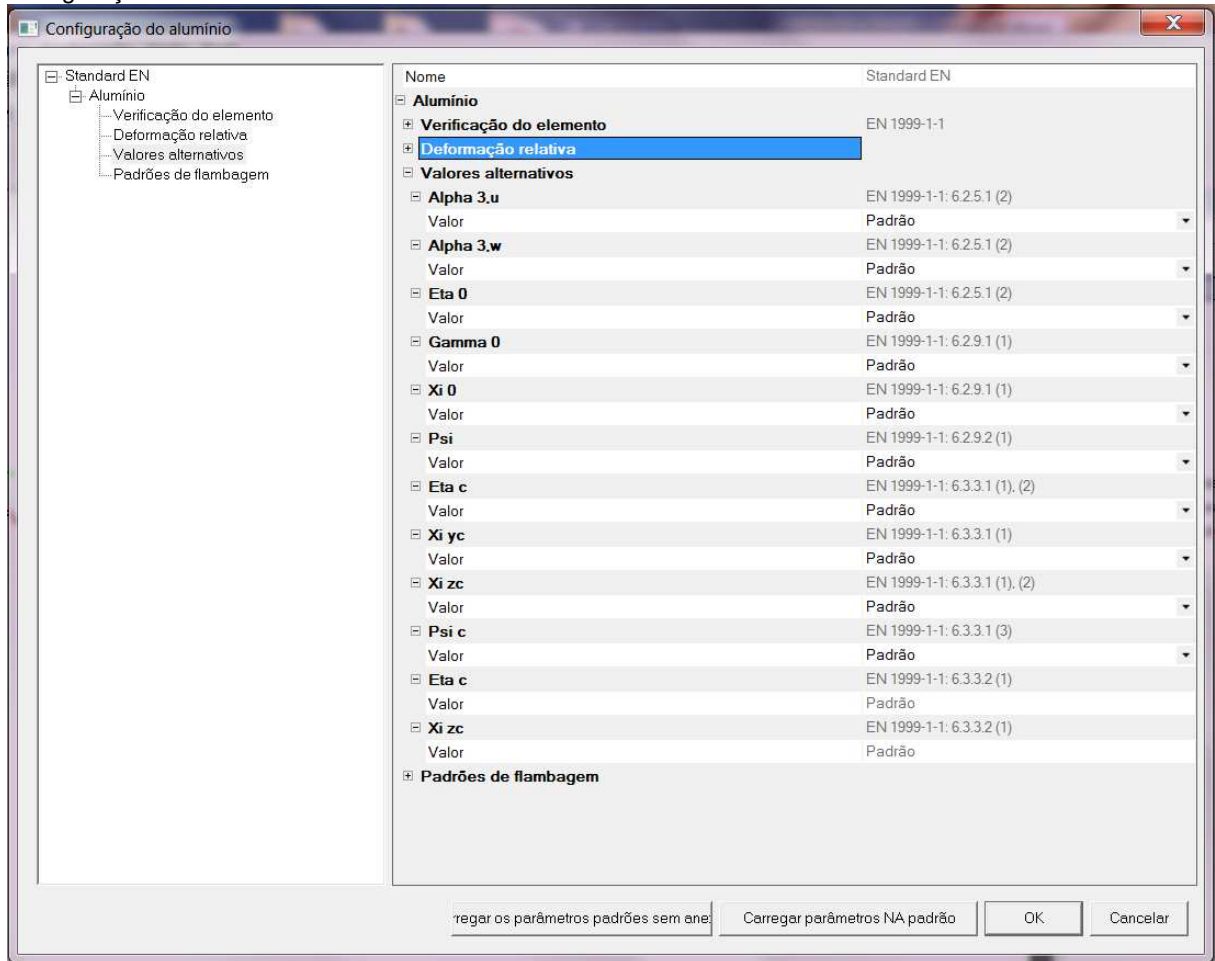
Os fatores de segurança parciais podem ser selecionados no Anexo Nacional. Os valores recomendados são dados na Tabela 6.1 (Ref.[1]).

Resistência das seções transversais independentemente da categoria	$\gamma_{M1} = 1,10$
Resistência dos elementos quanto à instabilidade avaliada por verificações dos elementos	$\gamma_{M1} = 1,10$
Resistência de seções transversais quanto à tensão de ruptura	$\gamma_{M2} = 1,25$

Utilizando o menu do Anexo Nacional, o usuário pode inserir valores para γ_{M1} e γ_{M2} .

Momentos fletores

De acordo com a seção 6.2.5.1 Ref.[1], podem ser encontrados valores alternativos para $\alpha_{3,u}$ e $\alpha_{3,w}$. No SCIA Engineer, o usuário pode inserir esses valores utilizando a função Alumínio > Vigas > Configuração do Alumínio > Valores Alternativos.



Força cortante

O valor de projeto da força cortante V_{Ed} em cada uma das seções transversais deve atender à (Ref.[1]):

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1$$

Onde V_{Rd} é a resistência à força cortante de projeto da seção transversal.

- Seções esbeltas e não esbeltas

As fórmulas a serem utilizadas na verificação da força cortante são dependentes da esbelteza da seção transversal das peças.

Para cada parte i a esbeltez β é calculado da seguinte forma:

$$\beta_i = \left(\frac{h_w}{t_w} \right)_i = \left(\frac{x_{end} - x_{beg}}{t} \right)_i$$

Onde: x_{end} Posição final da placa i .
 x_{beg} Posição inicial da placa i .
 t Espessura da placa i .

Para cada peça i a esbeltez β é então comparada com o limite 39ε

Onde $\varepsilon = \sqrt{250/f_0}$ e f_0 em N/mm²

$\beta_i \leq 39\varepsilon \Rightarrow$ Placa não esbelta

$\beta_i > 39\varepsilon \Rightarrow$ Placa esbelta

I) Todas as peças são classificadas como não esbeltas

$$\beta_i \leq 39\varepsilon$$

A verificação de Força Cortante deve ser verificada utilizando o art. 6.2.6. Ref.[1].

II) Uma ou mais peças são classificadas como esbeltas

$$\beta_i > 39\varepsilon$$

A verificação de Força Cortante deve ser verificada utilizando o art. 6.5.5. Ref.[1].

Para cada peça i é calculada a resistência da força cortante $V_{Rd,i}$.

Peça não esbelta

A fórmula (6.88) Ref.[1] é utilizada com propriedades calculadas a partir do formato reduzido para $N+(\rho_{u,HAZ})$

$$\text{Para } V_y: A_{net,y,i} = (x_{end} - x_{beg})_i \cdot \rho_{u,HAZ} \cdot t_i \cdot \cos^2 \alpha_i$$

$$\text{Para } V_y: A_{net,y,i} = (x_{end} - x_{beg})_i \cdot \rho_{u,HAZ} \cdot t_i \cdot \sin^2 \alpha_i$$

Onde: i O número (ID) da placa
 x_{end} Posição final da placa i .
 x_{beg} Posição inicial da placa i .
 t Espessura da placa i .
 $\rho_{u,HAZ}$ Fator de redução HAZ da placa i
 α Ângulo da placa i com relação ao eixo Principal y-y

Peça esbelta

A fórmula (6.88) Ref.[1] é utilizada com propriedades calculadas a partir do formato reduzido para N+(ρ_{u,HAZ}) da mesma forma que apresentada para a peça não esbelta. => $V_{Rd,i,yield}$

A fórmula (6.89) é utilizada com o comprimento do elemento **a** ou distância entre reforços (para seções em I ou U) => $V_{Rd,i,buckling}$

=> Para essa peça esbelta, o $V_{Rd,i}$ resultante é considerado como o valor mínimo para $V_{Rd,i,yield}$ e $V_{Rd,i,buckling}$

$V_{Rd,i}$ é então determinado para cada peça.

=> O valor de V_{Rd} da seção transversal é então considerado como a somatória das resistências $V_{Rd,i}$ de todas as peças.

$$V_{Rd} = \sum_i V_{Rd,i}$$

Observação:

Para uma barra sólida, tudo redondo ou tubo oco, todas as peças são consideradas não esbeltas por definição e fórmula (6.31) é aplicável.

➤ Exemplo

Aluminium.esa

- Cálculo do projeto
- Verificação do alumínio, saída detalhada

		β	39 ε	Esbelta?	$A_{vy,i}$	$A_{vz,i}$	$VRD_{y,yield,i}$	$VRD_{z,yield,i}$
1	RUO	10	43,07	não	2,9	37,1	0,31	4
2	I	29	43,07	não	53,9	4,1	5,8	0,45
					53,9	4,1	5,8	0,45
3	I	100	43,07	sim	10,5	139,5	1,13	15
					4,6	61,5	0,5	6,61
					10,5	139,5	1,13	15
4	I	31,5	43,07	não	58,5	4,5	6,3	0,48
					58,5	4,5	6,3	0,48
5	RUO	9	43,07	não	2,6	33,4	0,28	3,6

- Além disso: para a peça esbelta 3
- $a/b = 6000/200 = 30$, onde $a = 6m$, $b = 200mm$ e $v_1 = 0,280$

...: VERIFICAÇÃO DA SEÇÃO ...:

Verificação de compressão

De acordo com o artigo EN 1999-1-1 6.2.4 e fórmula (6.20).

Tabela de valores		
Aeff	393,70	mm ²
Nc,Rd	73,37	kN
Fator de verificação	0,14	-

Verificação cisalhamento

De acordo com o artigo EN 1999-1-1 6.5.5 e fórmula (6.87).

Cortante Vy

ID da Parte	Beta	VRd,Escoamento [kN]	VRd,Flambagem [kN]
1	10,00	0,31	
2	29,00	11,60	
3	100,00	2,73	0,85
4	31,50	12,60	
5	9,00	0,28	

Tabela de valores		
Vy,Rd	25,63	kN
Fator de verificação	0,22	-

Cortante Vz

ID da Parte	Beta	VRd,Escoamento [kN]	VRd,Flambagem [kN]
1	10,00	4,00	
2	29,00	0,88	
3	100,00	36,11	11,21
4	31,50	0,96	
5	9,00	3,60	

Tabela de valores		
Vz,Rd	20,64	kN
Fator de verificação	0,08	-

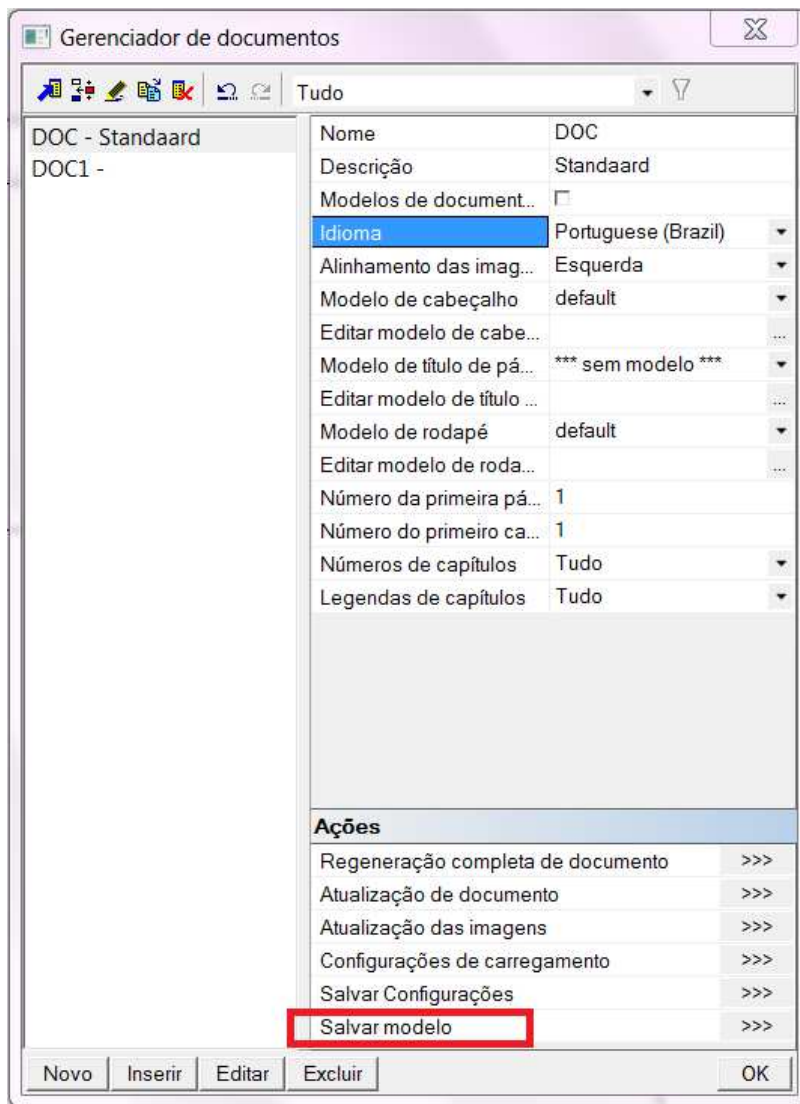
Documento

Exemplo

Scaffolding.esa

Consulte o documento anexo como exemplo

É possível salvar o documento como um modelo e utilizá-lo para outros projetos também.



Com essa opção é possível criar um documento uma única vez e utilizá-lo em todos os demais projetos.

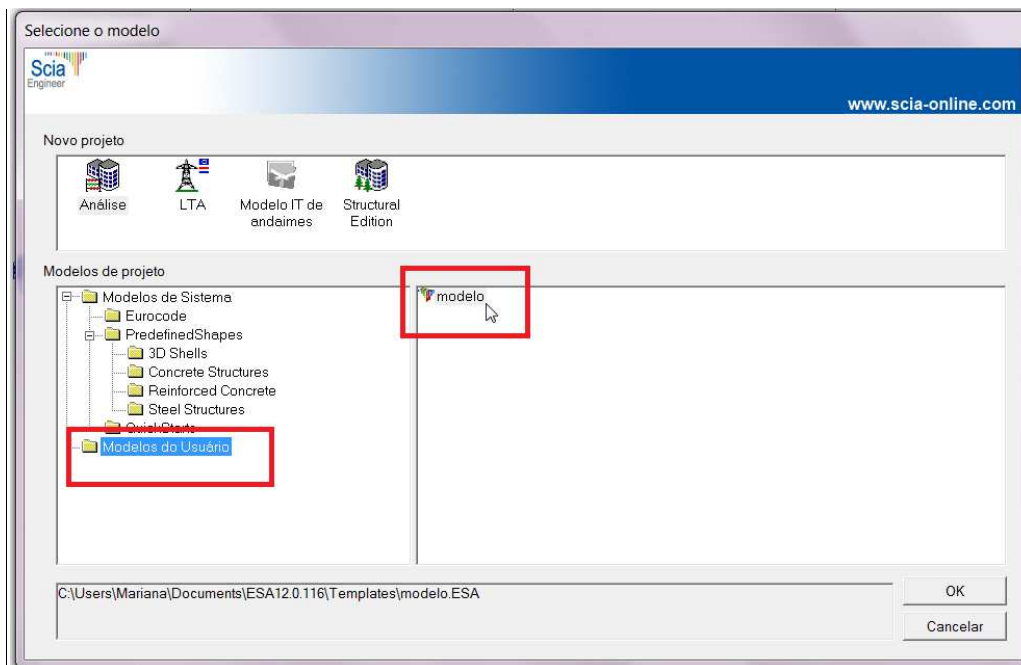
Modelo

Para criar um modelo, será necessário atender ao seguinte procedimento:

1. Criar um novo projeto ou abrir um projeto existente.
2. Definir todas as propriedades e peças semelhantes/iguais de uma estrutura que possam ser incluídas no modelo. Se for utilizado um projeto existente, fazer as alterações necessárias.
3. Quando estiver satisfeito com o resultado e julgar que o estado atual do projeto é o que deve ser utilizado como modelo, salvar como **modelo** utilizando a função de menu **Arquivo > Salvar Como**
4. Procurar pela pasta onde os modelos estão armazenados – essa pasta é especificada em **Configurações > Opções** (Configuração > Opções).
5. Digitar o nome do arquivo do modelo.
6. Concluir a ação.

Com essa possibilidade, é possível predefinir as seções transversais as combinações (não lineares) as articulações não lineares, o documento,...

Após salvar um projeto como um modelo, esse modelo pode ser aberto simplesmente mediante a criação de um Novo Projeto:



Blocos do Usuário

A aplicação dos blocos do usuário pode ser dividida em três etapas distintas. As etapas devem ser realizadas na ordem atribuída e todas devem ser executadas.

1. Como criar um bloco do usuário

Um **bloco do usuário** pode ser criado como um projeto padrão. Não há restrições explícitas com relação ao bloco. Normalmente, o usuário trabalhará em seu projeto e no final ou durante a fase de elaboração do projeto ele pode decidir fazer um **bloco do usuário** do estado atual do projeto.

Então, a única coisa a fazer é salvar o projeto em um disco. Poderá ser útil, no entanto, não obrigatório, utilizar a função **Salvar Como** e atribuir ao projeto um nome que o associe à estrutura do projeto.

2. Como armazenar o bloco de usuário na biblioteca

Para que seja utilizável como um **bloco do usuário**, o projeto deve ser armazenado na pasta **User Block Library** (Biblioteca de Bloco de Usuário) (veja a função Configuração do Programa > Configuração de Diretório. Isso pode ser feito de duas formas:

- O usuário especifica o caminho adequado no diálogo **Salvar Como** (veja o parágrafo acima) e salva o projeto diretamente na pasta **Biblioteca de Bloco do Usuário**.
- O usuário salva o projeto em sua pasta comum de projeto e então copia o arquivo para a pasta de **Biblioteca de Bloco de Usuário**. O arquivo pode ser copiado em qualquer ferramenta de gerenciamento de arquivo (por ex. Windows Explorer, Total Commander, My Computer dialogue, etc.).

Dica: Os blocos do usuário podem ser armazenados somente na pasta de **Biblioteca de Blocos do Usuário** mas podem ser dispostos em uma árvore de subpastas. As subpastas podem então agrupar blocos do usuário que possuem algo em comum. Essa disposição (distribuição) pode contribuir para uma aplicação mais simples e eficiente dos blocos do usuário, especialmente se passar um longo tempo a partir do data em que foram criados e armazenados.

Ao utilizar essa dica, todas as subpastas poderão ser selecionadas

3. Insira o bloco de usuário em outro projeto utilizando o seguinte procedimento:

1. Abrir **Estrutura**:
 - a. por meio da árvore de funções **Estrutura**,
 - b. ou por meio da Árvore de funções > **Estrutura**,
 - c. Ou por meio do ícone **Estrutura** na barra de ferramentas **Projeto**.
2. Selecionar e ativar a função **Blocos do Usuário**.
3. Um **Assistente de Blocos do Usuário** abre na tela. A janela do lado esquerdo mostra a organização da pasta **Biblioteca de Blocos do Usuário**, por exemplo, mostrando qualquer subpasta possível. A janela do lado direito mostra todos os **blocos de usuário** disponíveis salvos na pasta ou subpasta adequada.
4. Selecionar a pasta.
5. Selecionar o **Bloco de Usuário** necessário.
6. Clicar em **[OK]** para inserir o bloco no projeto atual.
7. Selecionar as opções necessárias para a importação (veja o procedimento abaixo).
8. Posicionar o bloco do usuário no local desejado e clicar no botão esquerdo do mouse para colocar o bloco na posição escolhida.
9. Se necessário, repetir a etapa anterior quantas vezes for preciso para concluir a operação.

Observação: Se o Bloco de Usuário for um projeto parametrizado, o programa perguntará ao usuário para disponibilizar todos os parâmetros necessários para poder concluir a definição do bloco do usuário.

Referências

- [1] DIN 4420
Arbeits- und Schutzgerüste
1990

- [2] HD 1000
Gevelsteigers bestaande uit prefab onderdelen
1992

- [3] EN 12811-1
Scaffolds (Andaimes): Performance requirements and general design 2003 (Requisitos de desempenho e projeto geral)

- [4] EN 12811-3: Scaffolds (Andaimes): Load Testing, 2003 (Teste de Carga)

- [5] EN 12810-1
Façade Scaffolds with Prefabricated Components (Andaimes de Fachada com Componentes Pré-Fabricados):
Products specifications 2003 (Especificações de Produtos)

- [6] EN 12810-2
Façade Scaffolds with Prefabricated Components (Andaimes de Fachada com Componentes Pré-Fabricados):
Particular methods of structural design 2003 (Métodos Específicos de Projeto Estrutural)

- [7] NBN ENV 1991-2-4
Belasting op draagsystemen: Windbelasting
1995

- [8] Eurocode 3 (Eurocódigo 3):
Design of Steel Structures 2002 EN 1993-1-1 (Projeto de Estruturas de Aço)

- [9] Handbuch des Gerüstbaus
Friedrich Nather, Hoachim Lindner, Robert Hertle
2005

- [10] Eurocode 9 (Eurocódigo 3):
Design of aluminium structures (Projeto de Estruturas de Alumínio)
Part 1 - 1 (Parte 1 -1): General structural rules EN 1999-1-1:2007 (Regras Gerais Estruturais)

- [11] Zulassung Z-8.22-64

- [12] Modeling – Geometric Stiffness – P - Δ (Modelagem - Rigidez Estrutural)

Anexo A: Pressão do Vento versus Força do Vento

No parágrafo "6 - Condições de Carregamento" o vento foi calculado de acordo com a EN1991-1-4 e calculado como uma pressão de vento.

De acordo com a EN 12810-1, é possível também calcular o vento como uma força de vento utilizando a seguinte fórmula (EN 12810-1, (1)):

$$F_K = c_s \cdot \sum_{i=1}^{i=n} A_i \cdot c_f \cdot q_i$$

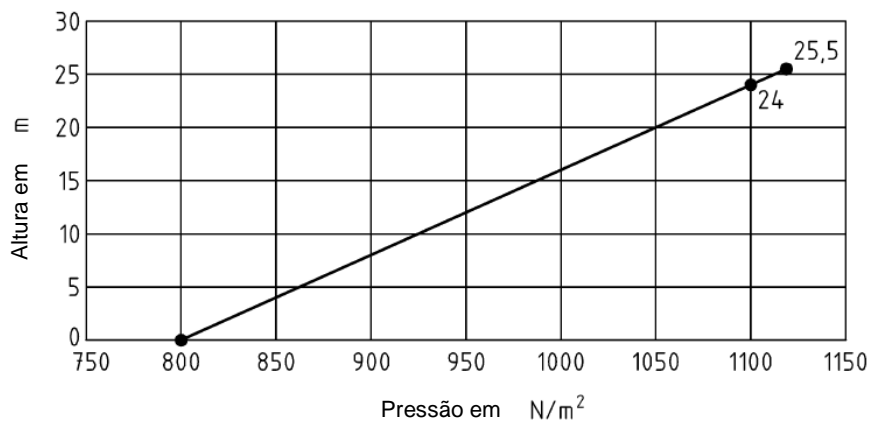
Onde

A_i é a área de referência especificada na norma EN 12810-1, Tabela 4 (veja também os dados abaixo)

c_f é o coeficiente da força aerodinâmica considerado a partir da norma EN 12810-1, Tabela 5 (veja também os dados abaixo)

c_s é o coeficiente local considerado a partir da norma EN 12810-1, Tabela 6 (veja também os dados abaixo)

q_i é a pressão da velocidade de projeto de acordo com a norma EN 12810-1, Figura 3:



Nesse exemplo, a altura das estruturas é de 11m, de modo que q_i em 11m é ± 940 N/m² e em 0m ± 800 N/m². Ao inserir um valor a média dos dois pode ser considerada: 870 N/m².

Área de Referência A_i :

Condições de revestimento na configuração do sistema	Área de Referência A_i :
	Sem revestimento
Com revestimento	Área superficial do revestimento (veja o Cap. A.3 da norma EN 12811-1:2003)

Esse foi um exemplo sem revestimento. Para um componente com um diâmetro de 48,3mm, a área é $0,0483m \times L_{\text{componente}}$

Coeficiente da força aerodinâmica c_f :

Condições de revestimento na configuração do sistema	Coeficiente da força	
	Normal à fachada	Paralela à fachada
Sem revestimento	1,3	1,3
Com revestimento	1,3	0,1

Em nosso exemplo a estrutura não continha revestimento. Examinaremos na força paralela à fachada, ou seja $c_f = 1,3$.

Coefficiente do local c_s :

Condições de revestimento na configuração do sistema	Coeficiente local	
	Normal à fachada	Paralela à fachada
Sem revestimento	0,75	1,0
Com revestimento	1,0	1,0

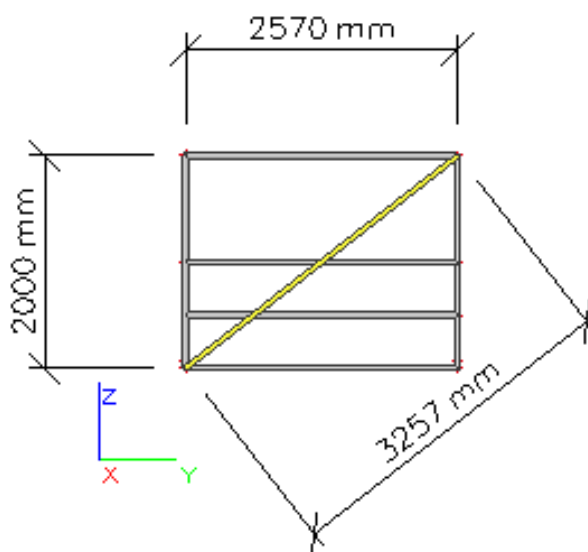
OBSERVAÇÃO: Os valores para os coeficientes correspondem à fachada com uma relação de solidez $\phi_B = 0,4$; consulte também a norma EN12811-1.

Para uma estrutura sem revestimento, o vento paralelo à fachada resulta em $c_s = 1,0$.

Para cada viga a força pode ser calculada como uma força linear, conforme mostrado abaixo:

$$F_K = c_s \cdot \sum_{i=1}^{i=n} A_i \cdot c_f \cdot q_i = 1,0 \cdot 0,0483m \cdot 1,3 \cdot \frac{870N}{m^2} = 54,6 \frac{N}{m} = 0,055 \frac{kN}{m}$$

Essa carga é aplicada às vigas mostradas abaixo (os rodapés não são considerados, porque o coeficiente de força só se encontra disponível para perfis em tubo):



Dessa forma, a força total inserida é:

$$\begin{aligned} &0,055 \text{ kN/m} \times \\ &[(2+2 \times 0,5) \times 2,57m \\ &+ (2 \times 0,5) \times 2m + 3,257] \\ &= 0,055 \text{ kN/m} (12,97m) \\ &= 0,71 \text{ kN} \end{aligned}$$

No cálculo de "6 – Caso de Carga", foi considerada uma carga de $0,17 \text{ kN/m}^2$. Esse valor multiplicado pela superfície ($= 2m \times 2,57m$) resulta na força total de $0,68 \text{ kN}$.

Veja as duas opções de resultado com valor próximo um ao outro.