

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO N° 3

Questão 3: ~~Os perfis conformados a frio (PFF)~~

Tem-se notícias de perfis formados a frio (PFF) sendo inicialmente usados nos EUA e UK por volta de 1850, sendo efetivamente popularizados em 1940.

Tais perfis são fabricados a partir do aço virgem, ainda não trabalhado, que geralmente passa por laminação por roletes, de forma que a chapa resultante apresente a espessura desejada. Depois estas chapas são dobradas com curvatura pré-estabelecida e, no caso de perfis tubulares, é feita a costura (solda) entre as extremidades. Todo este processo é realizado sem o aumento da temperatura dos materiais.

Os perfis formados a frio apresentam um alta relação entre momento de inércia e peso, o que os torna bastante econômicos quando usados em estruturas de menor porte, menos solicitadas, tendo em vista que são excelentes substitutos aos perfis laminados de menor espessura (em que enquanto perfis laminados mais robustos podem ser substituídos por perfis soldados). Destaca-se que nos dias atuais já é possível ver perfis formados a frio sendo utilizados onde antes apenas perfis mais robustos eram usados, como em torres de transmissão.

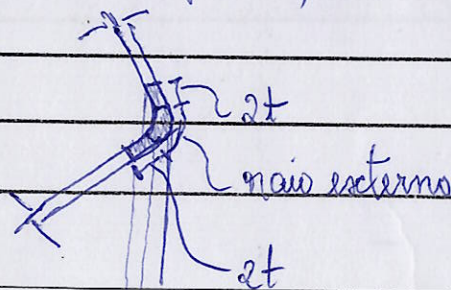
Embora os PFFs apresentem um série de vantagens, tais

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO Nº 3

perfis devem ser dimensionados com o devido cuidado pois são muito esbeltos e estão sujeitos à flambagem global, distorcional e local. A flambagem global pode ocorrer tanto por compressão quanto por flexão, a flambagem distorcional costuma ocorrer em mesas enrijecidas submetidas à compressão e a flambagem local é a flambagem pela compressão dos elementos de placa que compõem a seção.

Outro ponto que deve-se ressaltar sobre os PFEs é que durante o processo de dobramento dos perfis, a região da dobra (canto) sofre encruamento, de forma a apresentar resistência aumentada. No caso de aços inoxidáveis austeníticos pode até haver a indução da transformação da austenita em martensita pelo trabalho mecânico e a martensita apresenta dureza bem maior. O professor Gardner da Imperial College chegou a estabelecer um comprimento, além do raio de curvatura, que ~~aparece~~ junto à curva, apresenta a resistência alterada pelo processo e vale cerca de $2t$, sendo a tensão de escoamento da região encruada igual a aproximadamente $0,85 f_u$, onde f_u é a tensão última do metal antes da conformação. O esquema a seguir apresenta a região afetada:

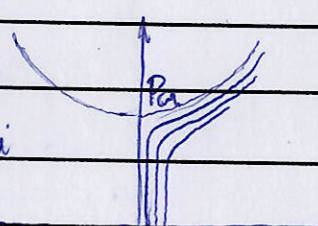


| | |
|--|--------------------------------------|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO N° 3

Flambagem; A flambagem é um fenômeno de instabilidade em que um elemento pode se apresentar em equilíbrio estável ou instável. Se este elemento está em equilíbrio estável, ele tem a capacidade de voltar ao seu estado de origem caso sofra alguma perturbação, caso o elemento se encontre em equilíbrio instável, o elemento não tem esta capacidade. O que faz com que o elemento chegue ao estado de equilíbrio instável é sua resistência à flambagem, que é função da carga crítica de flambagem, das não linearidades do sistema e possíveis imperfeições geométricas e/ou excentricidades de carga; conforme apresenta o gráfico abaixo

Conforme é apresentado a carga crítica diminui conforme a resistência as imperfeições iniciais (deslocamentos laterais, neste caso) aumentam



$v \rightarrow$ deslocamento lateral
 P_{cr} - carga crítica de flambagem

Resalta-se que as cargas críticas são calculadas com base em elementos inicialmente sem imperfeição em regime linear elástico, para pequenos deslocamentos.

→ Flambagem global por flexão ~~e~~ A carga crítica, chamada de carga crítica de Euler é formulada para uma colu-

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6 E9 |

QUESTÃO Nº 3

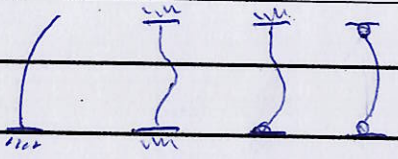
na inicialmente sem imperfeições com extremidades articuladas e é derivada da equação da viga de Euler para o equilíbrio de momentos causados por um campo de deslocamentos transversais v e pela compressão: $EI \frac{d^2 v}{dx^2} = Pv$ — solução $P_{cr} = n^2 \pi^2 EI / L^2$

No caso a solução é dada por um conjunto de deformadas (modos de falha) associados a cargas críticas específicas. Para fins de cálculo adota-se o primeiro modo de falha por estar relacionado a menor carga crítica, ~~também vale ressaltar~~ ou seja, para $n=1$. Também vale ressaltar que existe a solução trivial, em que $v=0$ para qualquer carga, o que indica que para ocorrer a flambagem, o elemento (coluna, neste caso) deve apresentar alguma imperfeição inicial e excentricidade de carga.

Caso deseje-se saber a solução para uma coluna com outras condições de contorno, multiplica-se L por K , que o transforma em um comprimento efetivo baseado no número de comprimentos de onda senoidais cada condição de contorno na coluna comprimida.

| | |
|--|--------------------------------------|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | BGES |

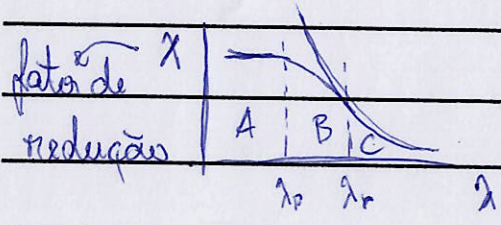
QUESTÃO Nº 3



| | | | | |
|----------------------|---------|----------|---------|-------|
| teórico | $K=2$ | $K=0.5$ | $K=0.7$ | $K=1$ |
| recomendado NBR 8800 | $K=2.1$ | $K=0.65$ | $K=0.8$ | $K=1$ |

No geral as normas realizam o dimensionamento à flambagem baseadas em curvas de flambagem ϕ que funcionam de forma a fornecerem um fator

de redução da resistência em função ϕ da esbeltez da peça, podendo apresentar limites que definem se o elemento é compacto, semi compacto ou esbelto, como o exemplo a seguir



A = compacta = atinge o regime plástico antes de flambar
B = semi-compacta = ocorre uma flambagem em regime na linear
C = esbelta = flamba antes de atingir o escoamento

λ = esbeltez da peça
 λ_p = esbeltez limite - plastificação
 λ_r = esbeltez limite - início do escoamento

→ flambagem global por torção: basicamente ocorre em seções cruciformes esbeltas ou naquelas em que o centro de cisalhamento não coincide com o centróide da seção sendo a carga crítica calculado em função das constantes de torção e emparramento, além do módulo de elasticidade, módulo de elasticidade

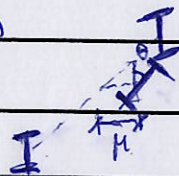
| | |
|--|--------------------------------------|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO N° 3

transversal e raio de torção polar. Esta é causada pela compressão da seção
 → Flambagem global por flexotorsão: É dada em função das cargas críticas de flexão e torção, ocorrendo os dois fenômenos ao mesmo tempo causada por compressão

→ Flambagem global lateral com torção: Ocorre sob flexão de forma que a região comprimida se desestabiliza e busca por uma nova configuração de equilíbrio, mas por estar continuamente ligada a região traçãoada, há uma combinação de translação e rotação da seção

como ilustrado:



A carga crítica é calculada a partir da viga padrão que não apresenta

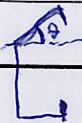
imperfeições, é bi-apoiada, com extremidades travadas à rotação, está sob ação de momento contínuo, possui seção com dupla simetria e são consideradas pequenas deformações.

Além disso esta carga é multiplicada por um fator C_b que leva em consideração a distribuição de momentos ao longo da viga.

→ Flambagem distorcional: Ocorre geralmente em mesas com enrijecedor de forma sob compressão, de forma que a mesa se rotaciona em relação a seu eixo com a

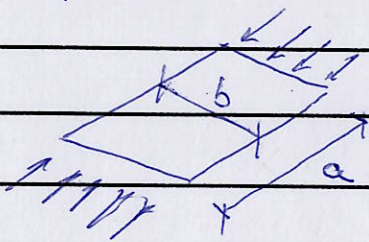
| | |
|--|--------------------------------------|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO Nº 3

alma, conforme ilustração: 

Este tipo de falha foi estudada por Lam e Hancock, sendo a carga crítica obtida por eles de forma a considerar o comportamento isolado da mesa e seu enrijecedor como uma viga com vínculo semi-rígido à alma.

→ Flambagem local: ocorre em placas e ~~trabalha sob~~ a carga crítica pode ser calculada pela formulação de Timoshenko baseada nas equações de von Karman: $P_{cr} = K \frac{\pi^2 D}{b^2} \rightarrow D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$



A placa é apoiada em todos os bordos na direção transversal ao plano. Dá a rigidez à flexão da placa e K

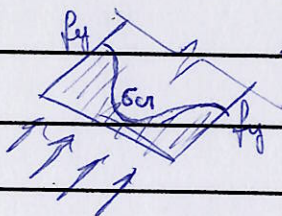
é um fator que depende da relação a/b e do número de meias ondas senoidais consideradas em cada direção.

A distribuição de tensões na placa se inicia de maneira uniforme até que a região central atinge a carga crítica. Por conta dos efeitos membrana, as tensões se redistribuem para as bordas ~~por~~ até atingirem o escoamento. Para simplificar os cálculos, von Karman propõe o método das larguras efetivas, em que a largura da placa é (MLE)

| | |
|--|--------------------------------------|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO Nº 3

reduzida de forma que a distribuição de tensões passe a ser uniforme e com mesma resultante que a situação real. De forma semelhante, no Brasil, Batista desenvolveu o método das seções efetivas (MSE) que ao invés de calcular a área efetiva placa por placa, a seção inteira tem a área reduzida em função de sua esbeltez.



Dimensionamento:

Segundo a norma brasileira, ~~é a norma~~ NBR 14762, é utilizado o método da resistência direta (MRD) desenvolvido por Schlaich ~~para~~, baseado em uma única curva ~~de esbeltez~~ de flambagem que fornece um fator de redução da resistência em função da esbeltez reduzida da seção, dada por $\bar{\eta} = \sqrt{A_f y / P_{cr}}$ no caso de compressão e $\bar{\eta} = \sqrt{W_{el} f_y / M_{cr}}$ para flexão, de forma que P_{cr} se refere à menor dentre $P_{cr, flexão}$, $P_{cr, torção}$, $P_{cr, flexo-torção}$, no caso de flambagem global e $P_{cr, distorcional}$, para a verificação da flambagem distorcional causada por compressão. Já M_{cr} vale $M_{cr, FLT}$ para a verificação da flambagem lateral com torção e $M_{cr, distorcional}$ para a verificação da flambagem por distorção.

| | |
|--|--------------------------------------|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | 06E9 |

QUESTÃO N° 3

causada pela compressão. De forma resumida, as verificações a serem feitas são:

compressão \rightarrow global = $\chi A \sigma_{fy}$
 \rightarrow distorcional = $\chi A \sigma_{fy}$

flexão \rightarrow FLT = $\chi W \sigma_{fy}$
 \rightarrow início do escoamento \circledR $W \sigma_{fy}$
 \rightarrow distorcional = $\chi W \sigma_{fy}$

Os resultados das cargas críticas podem ser obtidos por programas como o CVFSM, baseado na teoria das tiras finitas, ou o GBTul, baseado na teoria generalizada de vigas

Outros métodos de cálculo também podem ser empregados, como o da norma europeia que classifica as seções quanto a capacidade de formar α quanto a sua esbeltez e capacidade resistente e utiliza 5 curvas de flambagem baseadas em níveis de imperfeição inicial diferentes. Já o método da resistência contínua consiste em ~~os~~ limitar a deformação das seções \circledR em função da esbeltez da seção a partir de uma curva elasto-plástica com encunamento

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO N° 3

- Combinação da flexão com cortante segundo a NBR 14762

- Sem enrijecedor : $\left(\frac{M_{sd}}{M_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{V_{sd}}{V_{rd}}\right) \leq 1$

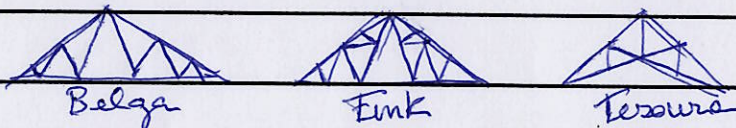
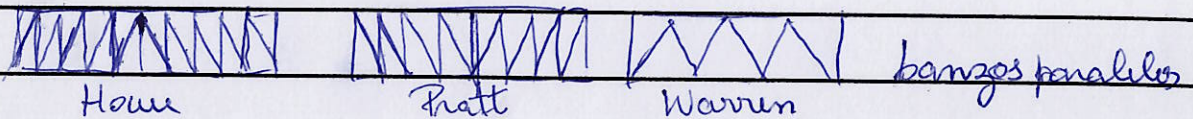
- Com enrijecedor : $0,6 \frac{M_{sd}}{M_{rd}} + \frac{V_{sd}}{V_{rd}} \leq 1,3$

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | BGE9 |

QUESTÃO Nº 1

As vigas treliçadas são estruturas capazes de suportar cargas significativas, vences grandes e são muito econômicas, dada a sua geometria baseada em triângulos, formas geométricas que não podem ser distorcidas sem a alteração do tamanho de suas arestas.

São comumente utilizadas em pontes e coberturas e se apresentam nas mais diversas formas:



As treliças Howe, para cargas gravitacionais, apresentam diagonais comprimidas e montantes traçados, já o contrário ocorre com as treliças Pratt. Tendo-se em vista que nas treliças Howe os elementos mais esbeltos estão sob compressão, então comumente as treliças Pratt são mais econômicas.

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO Nº

Esse tipo de análise deve ser feita para um dimensionamento mais econômico.

Trelizas de longo paralelo são comumente usadas em pontes e pontes, contudo, as trelizas de longo superior inclinado são amplamente usadas em telhados, mas ainda existem as trelizas de longo superior arqueado, de diminuem a solicitação das diagonais e montantes e costumam ser usadas em estruturas mais robustas com estádios e pontes maiores.

Para um dimensionamento mais eficiente pode-se, a critério do projetista, respeitar certas relações altura / largura:

- longo superior inclinado : 1/6
- " " arqueado : 1/6 - 1/8
- longos superior paralelo : 1/8 - 1/10

Ao se projetar uma treliza, é importante que os eixos de todas as barras se encontrem em um único ponto, sendo este o nó. Isso é importante para que não haja excentricidades nos nós. Idealmente, uma treliza apresenta nós rotulados, mas hoje em dia é mais plausível adotar um comportamento sem-rígido para este, o que torna os modelos o modelo de treliza

| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
|--|--------------------------------------|
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO Nº

1

ça uma opção apenas para quando as barras forem de perfis esbeltos e ~~ou~~ a treliça não estiver sob carregamento cíclico, não podendo haver excentricidades nos nós, como comentado antes.

Nestes casos e nos demais o momento ocasionado pela excentricidade deve ser considerado e distribuído entre as barras levando-se em consideração um modelo de pórtico.

Caso seja adotado um modelo de treliça e ~~se~~ haja carga aplicada entre os nós, tal barra deve ser calculada como viga bi-apoiada e a treliça pode ser resolvida por métodos como o dos nós, das seções ou de equilíbrio.

Tendo em vista que muitas vezes os membros são elementos contínuos, é possível ainda adotar um modelo misto treliça-pórtico.

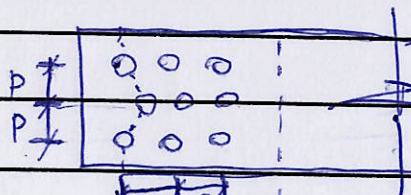
Vale ressaltar que hoje em dia tem se popularizado programas computacionais que auxiliam com o dimensionamento e obtenção de esforços internos com o RISA ou o Cype Metálicas.

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO Nº 1

Em geral ligações soldadas são mais rígidas que parafusadas, porém requerem mão de obra mais especializada enquanto as ligações parafusadas ainda permitem a desmontagem da estrutura.

As barras das ligações devem ser dimensionadas à tração e à compressão. Na tração pode haver a falha pelo escoamento da seção ^{búta} ou pela ruptura do arço líquido, dados respectivamente por $A_g f_y$ e $C_r A_n f_y$, onde A_g é a área ~~de~~ búta, A_n a área líquida e C_r é um redutor de área que leva em consideração o efeito Shear lag e possíveis excentricidades.



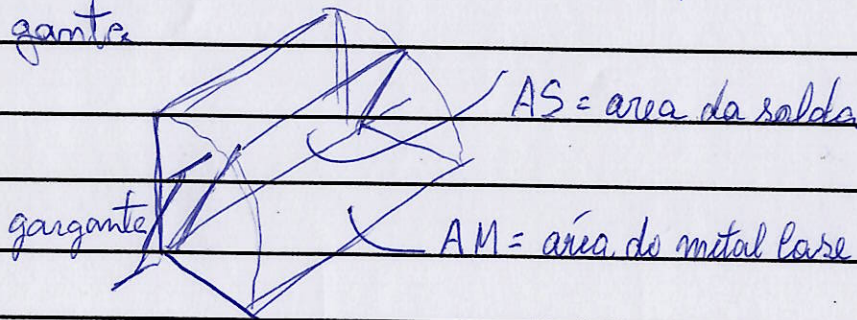
L seção búta
área líquida, descontando-se os furos e considerando-se a trajetória parabólica da fatura entre furos, descoberto por Cochran em 1922, dada por $s^2/4p$

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | BGE9 |

QUESTÃO Nº 1

A resistência a compressão é dada por $\chi \omega A_g f_y$, sendo χ o fator de redução à flambagem obtido pela curva do MBD para $\bar{\lambda} = (\omega A_g f_y / P_{cr})^{1/2}$, sendo P_{cr} a carga crítica que controla a flambagem e ω é o fator que reduz a área por escotada da flambagem local.

Resistência da solda: Deve ser verificada em função das tensões normais e cisalhantes que atuam no plano da garganta.



f_w = resistência da solda
 f_y = resistência do metal base

Parafuso: Tração }
Corte } Verificações
Tração + corte }
Esmagamento }

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B669 |

QUESTÃO Nº 2

As treliças espaciais são estruturas de grande estabilidade que conseguem suportar grandes cargas e vencer grandes vãos. São muito utilizadas em coberturas de aeroportos ou estádios, por exemplo. É muito comum ver treliças compostas por perfis tubulares, hoje em dia, tendo em vista que são seções com grande inércia, dando que a distribuição de massa se dá longe do centroide da seção e estes perfis não apresentam uma direção preferencial para a ocorrência da flambagem.

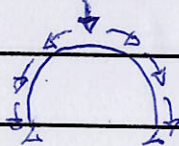
Tem-se notícia de que as primeiras estruturas treliçadas espaciais datam do século XVIII, mas foi no início do século XX que Graham Bell trouxe a tona estas estruturas com características tão únicas.

Em 1930, a empresa japonesa TOMOE corporation patenteou a treliça em diamante, dada a grande demanda por soluções estruturais para a cobertura de hangares para aviões, mas foi em 1960, com o acontecimento do primeiro congresso voltado para treliças espaciais que os estudos acerca do assunto realmente se popularizaram.

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | 3669 |

QUESTÃO Nº 2

As treliças espaciais podem se apresentar em três formas básicas, com banzo plano, com curvatura simples ou dupla, como no caso de cúpulas. Nestas situações a distribuição das cargas quantitativas até os apoios é muito mais eficiente, com



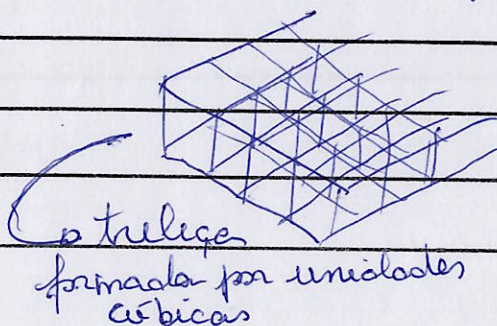
ilustra o esquema. Além disso, as treliças, que não são mais representadas por linhas, mas por superfícies podem se apresentar em múltiplas camadas, ~~os banzo são~~

Por fim, os banzo são formados por módulos que formam mosaicos e, a depender da disposição dos banzo, uns sobre os outros, pode-se ter estruturas, até mais estáveis

Por exemplo:

Banzo de módulos quadrados sobre banzo de módulos quadrados

X Banzo de módulos quadrados sobre banzo de módulos quadrados com offset de meio módulo



→ Neste caso a treliça é formada por pirâmides, portanto mais estável

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | BCE9 |

QUESTÃO Nº 2

Vale ressaltar que é possível realizar uma otimização da treliça com base em uma função objetivo estocástica o computacionalmente, com o auxílio de programas como o ANSYS ou o ABAQUS

Tipos de ligações

- barras de ponta achatada unidas por parafusos: São mais comuns e baratas, mas provocam excentricidade no nó e as barras não têm inércia constante

- barras de ponta amassada ligadas à nós de placa: elimina o problema da excentricidade

- barras com chapa de ponteira ligadas à nós de placa: elimina o problema da variação da inércia e da excentricidade

Existem ainda nós mais elaborados ~~e mais~~ como o sistema MERO da Alemanha ou o TRIODETIC, do Canadá, mas embora estes sejam quase perfeitos, são bem mais caros

- O dimensionamento de treliças espaciais se inicia, basicamente, com sua concepção em programas computacionais do tipo CAD (Computer Assisted Design) nos quais as estruturas são desenhadas com o auxílio de ferramentas próprias, como a repetição

| | |
|--|---|
| PROVA ESCRITA (CADERNO DE RESPOSTAS) | CÓDIGO DE IDENTIFICAÇÃO DO CANDIDATO |
| LOCAL: SALA 201 – BLOCO D – ESCOLA POLITÉCNICA/CT/UFRJ DATA: 02/12/2024 | B6E9 |

QUESTÃO Nº 2

matricial de máscara ou o espelhamento, são comuns programas como o AutoCAD, SolidWorks e CATIA,

Em seguida, a estrutura é exportada para programas do tipo CAE (Computer Assisted Engineering), que por meio do método dos elementos finitos e normas pré-selecionadas, executam o dimensionamento. São comuns programas como o RISA ou o Cupe Metálicas.

Programas como o ANSYS ou o ABAQUS ainda podem ser usados para a análise de detalhes específicos.

O método dos elementos finitos é um método numérico que neste caso se utiliza de método variacional para solução do problema de energia para a obtenção da matriz de rigidez e posterior solução do problema.