1. Resumo e conclusoes

Objeto

Duas escadas internas de aco com fechamento em madeira (projeto arquitetonico 'Escada Interna - 02', Manaca Atelie):
escada 1 (terreo -> superior, em U, patamares 1 e 2) e escada 2 (superior -> patamar casal). Geometria, perfis, soldas
e fixacoes conforme 'projeto-3-completo.pdf' (ou projeto-1, sem guarda-corpo). VERSAO 4: estrutura escondida sob a madeira (longarinas 100x100x2,65 recuadas; patamares em tubo 200x50x3)
(a versao 1, em tubo 50x50x3, com seus resultados, esta guardada na pasta v1-tubo-50x50).

Como foi calculado

Portico espacial de barras (rigidez direta, 6 graus de liberdade por no), programa proprio em Python (analise_final.py).
Cada chumbador foi modelado na sua posicao, como mola que so trabalha a tracao; a viga de parede encosta na parede por
contato que so trabalha a compressao (resolvido por iteracao). A rigidez do chumbador nao e conhecida, entao todos os
resultados sao dados para dois valores, 10 e 40 kN/mm, que delimitam a faixa provavel.

Conclusoes

Verificacao	Resultado (10 a 40 kN/mm)	Limite	Situacao
Barras de aco, escada 1 (tensao ELU)	63 a 65 MPa	227 MPa	ATENDE
Barras de aco, escada 2 (tensao ELU)	61 a 67 MPa	227 MPa	ATENDE
Flecha total, escada 1	2.0 a 2.5 mm	6,1 mm (balanco, 2L/350)	ATENDE
Flecha total, escada 2	1.3 a 1.7 mm	6,1 mm (balanco, 2L/350)	ATENDE
Chumbador mais tracionado, patamar 1 (graute)	4.0 a 8.1 kN	5 kN (adotado)	NAO ATENDE
Chumbador mais tracionado, patamar 2 (graute)	3.6 a 6.0 kN	5 kN (adotado)	NAO ATENDE
Chumbador mais tracionado, patamar casal (concr	3.3 a 5.7 kN	15 kN (tipico em concreto)	ATENDE
Corte nos chumbadores da parede (graute), P1 e P	ate 2.3 kN	nao definido	A VERIFICAR
Corte nos chumbadores das colunas grauteadas	ate 5.3 kN	nao definido	A VERIFICAR
Poste do gradil 30x30x2 (1,0 kN/m no corrimao)	1228 MPa	227 MPa	NAO ATENDE
Cantoneira + espelho sob carga concentrada	ver item 5	-	ATENDE
Painel de patamar 20 mm (vao 525 mm)	0,3 mm / 1,3 mm	L/350 = 1,5 mm	ATENDE
Parede: momento fora do plano por patamar	ver item 4	-	A VERIFICAR

Pontos que NAO fecham e precisam de decisao

1) Fixacao dos patamares 1 e 2: chumbadores so nas celulas com graute (azuis na planta): 3 no patamar 1 e 4 no patamar 2, 3 chumbadores por celula.
O chumbador de cima mais carregado recebe 4.0 a 8.1 kN no patamar 1 e 3.6 a 6.0 kN no patamar 2, contra 5 kN adotados. Barras e flecha atendem com folga. Celulas com conduite (amarelas) nao podem ser furadas. A fixacao depende da capacidade real do chumbador (ensaio) ou de uma das medidas do item 6.
2) Gradil: o poste 30x30x2 isolado nao resiste a carga de norma no corrimao (item 5). Precisa de poste mais robusto nos extremos e cantos, ou do corrimao ancorado nas paredes.
3) A capacidade de 5 kN por chumbador em furo grauteado de tijolo ecologico e ESTIMADA. So ensaio de arrancamento define.
4) A parede de 15 cm recebe 2 a 3,5 kNm fora do plano por patamar, por 3 ou 4 celulas grauteadas (item 4): verificar a armadura das celulas.
5) Vibracao (frequencia propria) e fadiga nao foram verificadas.

Documento de apoio para conferencia por engenheiro habilitado. Nao substitui projeto estrutural com ART.

2. Premissas, acoes e modelo

Normas de referencia

NBR 6120:2019 (acoes), NBR 8800:2008 (estruturas de aco), NBR 8681 (combinacoes), NBR 7190 (madeira), NBR 14718 (guarda-corpos).

Materiais

Aco dos tubos: fy = 250 MPa (valor adotado para tubo comercial; exigir certificado), E = 200 GPa, G = 77 GPa.
Longarinas, travessas e tubos de apoio: tubo 100x100x2,65 (A = 10.32 cm2, I = 163 cm4, W = 32.6 cm3).
Quadro dos patamares (todas as vigas, escondidas): tubo 200x50x3 em pe (Ix = 656 cm4, Wx = 65.6 cm3), topo 20 mm abaixo do piso.
Longarinas recuadas 20 mm (abaixo do piso e atras do espelho): a madeira cobre a largura inteira e cada longarina recebe metade da largura do lance.
Madeira: 20 mm, E = 12 GPa adotado (dicotiledonea classe C40 ou superior).

Acoes

Sobrecarga de utilizacao: 2.5 kN/m2 em projecao horizontal (NBR 6120, escadas de edificacoes residenciais).
Peso proprio do aco: 77 kN/m3 x area de cada barra. Madeira: 0.20 kN/m2. Gradil e cantoneiras: 0.2 kN/m por longarina.
Carga total de servico: escada 1 = 25.5 kN; escada 2 = 10.6 kN.

Combinacoes

ELU: 1.4 x permanentes + 1.5 x sobrecarga. Resistencia do aco: fy / 1.1 = 227 MPa (tensao combinada N/A + Mx/Wx + My/Wy, com torcao por von Mises). ELS: permanentes + sobrecarga, sem majoracao.
Carga total de calculo: escada 1 = 37.5 kN; escada 2 = 15.5 kN. Conferencia: soma das reacoes verticais do modelo = 37.5 kN e 15.5 kN (equilibrio fechado).

Criterios de flecha

Borda livre dos patamares (balanco de 1075 mm a partir da parede): 2L/350 = 6,1 mm. Lances: L/350 do vao entre apoios.

Modelo

Barras pelo eixo de cada tubo. Longarinas em zigue-zague modeladas trecho a trecho (400 mm horizontal + montante), com nos rigidos
nas soldas. Carga dos degraus aplicada nos trechos horizontais das longarinas (metade da largura para cada lado).
Patamares: viga de parede, lateral da janela, viga oculta, travessas. A carga do painel vai para as vigas perpendiculares a parede
por faixa de influencia. Ligacoes excentricas (montante de canto soldado de lado na viga oculta etc.) por barras rigidas.

Apoios

Pe do lance 01-05, topo do lance 12-16 e base do lance do casal: articulados (so forcas), em vigas de concreto.
Patamares 1 e 2: viga de parede encostada em parede de tijolo ecologico de 150 mm so nas celulas com graute da planta de alvenaria (3 em P1, 4 em P2); 3 chumbadores M12 por celula
com 120 mm de embutimento, SEM atravessar a parede. Patamar casal: viga de parede em viga de concreto armado.
Colunas 150x150 grauteadas nos cantos: 3 chumbadores nos patamares 1 e 2 (2 no casal), atravessando a lateral da janela.
Chumbador = mola (axial so de tracao; corte nos dois sentidos). Contato viga-parede = mola so de compressao, no topo e na base
da viga, em cada posicao de chumbador. Conjunto ativo resolvido por iteracao ate estabilizar.

Verificacao do programa

Caso de teste embutido: viga biapoiada com carga no meio, flecha = PL3/48EI, erro < 1e-6. Equilibrio global conferido acima.
Montagem: 291 juntas soldadas verificadas no modelo 3D (nenhuma sobreposicao, todo perfil ligado por face); 62 m de filete.

3. Resultados globais

Escada	k chumb. (kN/mm)	Flecha total (mm)	Flecha so sobrecarga	Local da flecha (mm)	Desloc. horiz. (mm)	Tensao ELU (MPa)	Barra mais solicitada
Escada 1	10	2.50	1.81	x=1150 y=1495 z=1161	1.11	65	P2 travessa de chegada
Escada 1	40	1.99	1.44	x=1150 y=1495 z=1161	0.90	63	P2 viga oculta
Escada 2	10	1.65	1.14	x=1080 y=1100 z=3920	0.97	67	P3 travessa do meio
Escada 2	40	1.25	0.90	x=1430 y=1075 z=3795	0.77	61	P3 travessa do meio

Reacoes de calculo nos apoios em viga de concreto (kN)

Apoio	Fx (ao longo do lance)	Fy (transversal)	Fz (vertical)
pe do lance A (parede)	-4.25 / -2.45	0.07 / 0.04	4.20 / 3.08
pe do lance A (interno)	-7.83 / -5.77	0.18 / 0.15	6.90 / 5.59
topo do lance E (interno)	7.14 / 5.47	0.10 / 0.09	6.11 / 5.10
topo do lance E (parede)	0.10 / -0.35	-0.06 / -0.08	1.43 / 1.12
base do lance D (parede)	-3.76 / -2.81	0.02 / 0.01	4.08 / 3.43
base do lance D (interno)	-4.93 / -3.79	0.11 / 0.10	5.21 / 4.46

Valores para k = 10 / 40 kN/mm. Cada apoio e um tubo 100x100 com 4 chumbadores: forca por chumbador inferior a 2 kN.

Leitura

As barras trabalham com folga: tensao maxima 67 MPa contra 227 MPa (29% de aproveitamento).

A flecha depende da rigidez da fixacao na parede: com chumbador flexivel (10 kN/mm) o patamar gira mais e a escada desce mais.

Com o tubo 100x100 a flecha maxima (2.5 mm) fica abaixo do limite de balanco (6,1 mm) e tambem dos 4,3 mm (L/350 de um lance de 1,5 m).

Na versao 1 (tubo 50x50x3) a flecha era de 4,8 a 6,3 mm e a tensao de 152 a 178 MPa.

Versao 3 (faixa aparente de 100 mm): flecha de 1,6 a 2,2 mm. A versao 4 fica um pouco acima porque o quadro do patamar volta ao tubo 200x50.

A escada 1 so funciona com os patamares engastados na parede: sem o engaste a flecha passa de 25 mm (estudo anterior).

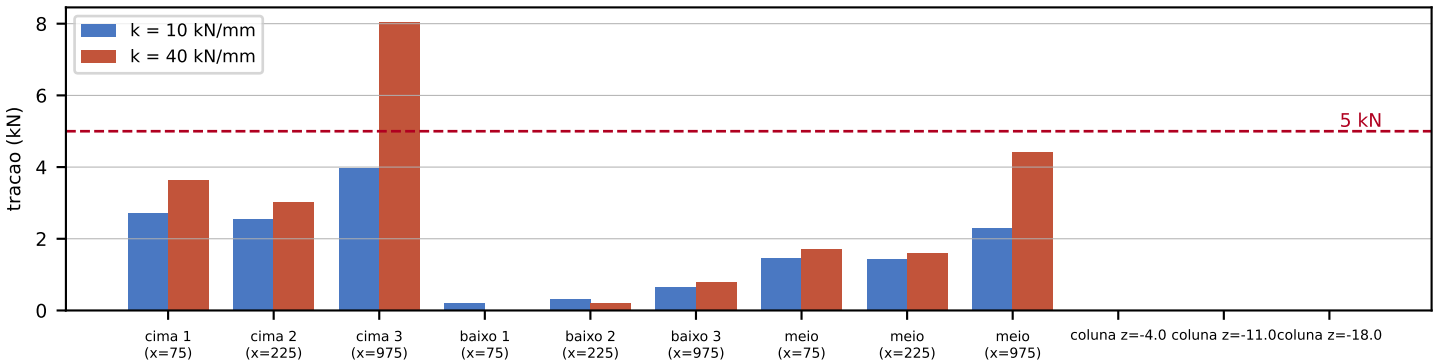
Compressao da viga contra a parede

Soma das forcas de contato (ELU): escada 1 = 67 kN nos dois patamares; escada 2 = 26 kN.

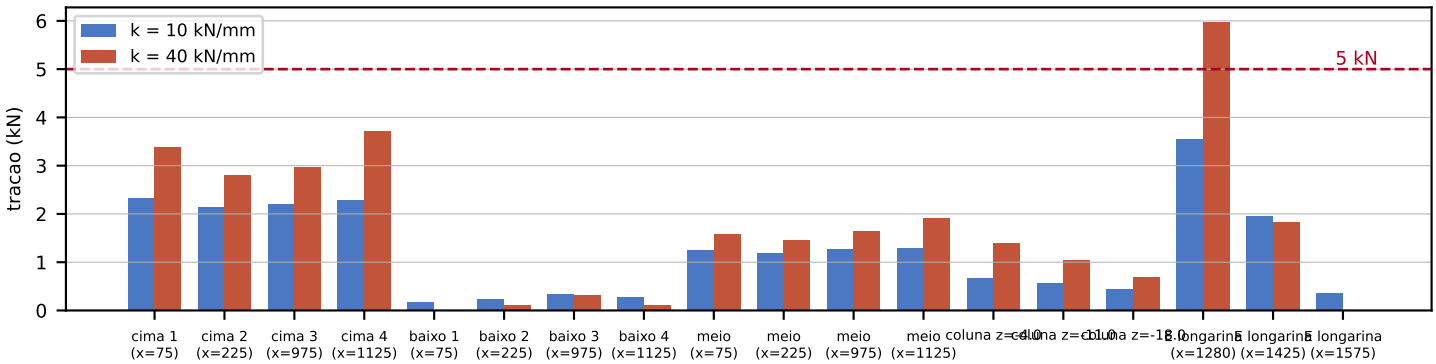
Com faixa de contato de ~30 mm de altura por 1200 mm, a pressao media na alvenaria fica em torno de 1,3 MPa por patamar, concentrada junto as vigas perpendiculares. Comparar com a resistencia do tijolo ecologico e do graute.

4. Fixacao nas paredes: forca em cada chumbador

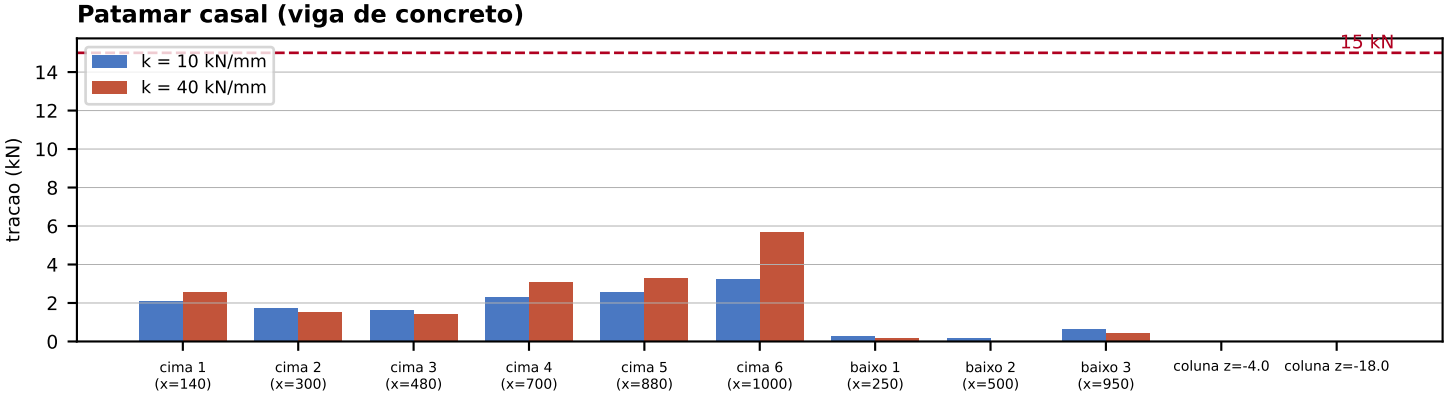
Patamar 1 (parede com graute)



Patamar 2 (parede com graute)



Patamar casal (viga de concreto)



Leitura

A soma das tracoes por patamar (16 a 23 kN no patamar 1, 21 a 28 kN no patamar 2) corresponde ao momento do balanco dividido pela distancia entre a fileira de cima e a base da viga (~0,17 m). O total nao muda; o que muda e como ele se reparte.

A reparticao NAO e uniforme. A carga chega a viga de parede pelas duas vigas perpendiculares (lateral da janela e viga oculta), e so ha chumbador nas celulas grauteadas (3 no patamar 1, 4 no patamar 2; as do meio estao vazias ou tem conduite). A celula mais proxima da viga oculta recebe mais;

quanto mais rigido o chumbador, maior a concentracao. Os chumbadores de baixo quase nao trabalham a tracao.

Patamar 1: pico de 4.0 a 8.1 kN, contra 5 kN adotados. Atende com chumbador flexivel (10 kN/mm); NAO ATENDE com rigido (40 kN/mm).

Patamar 2: pico de 3.6 a 6.0 kN. Atende com chumbador flexivel (10 kN/mm); NAO ATENDE com rigido (40 kN/mm). Os 2 pela longarina do lance E entram nessa conta.

Patamar casal (concreto): pico de 3.3 a 5.7 kN, dentro do usual para M12 quimico em concreto armado.

Corte: ate 2.3 kN nos chumbadores da parede (patamares 1 e 2, sem coluna) e 5.3 kN nos das colunas grauteadas. Verificar com o fabricante da resina ou por ensaio.

Momento transmitido a parede

Patamar 1: ~2.7 kNm; patamar 2: ~3.6 kNm (ELU), fora do plano, numa faixa de 1,2 m de parede de 15 cm.

Esse momento entra por 3 ou 4 celulas grauteadas (ordem de 1,8 kNm por celula com 1 barra de 10 mm): pouca folga; depende da armadura.

E a principal verificacao a ser feita pelo engenheiro responsavel pela casa, junto com o corte nos chumbadores.

Documento de apoio para conferencia por engenheiro habilitado. Nao substitui projeto estrutural com ART.

5. Verificacoes locais (calculo manual)

5.1 Cantoneira 30x30x3 sob o degrau (vao de 1000 mm entre longarinas)

Carga distribuida de servico em cada cantoneira: (2,5 + 0,2) kN/m2 x 0,30 m / 2 = 0.41 kN/m.
Md = 1,5 x q x L2/8 = 0.076 kNm -> sigma = Md / W = 117 MPa (W = 0,65 cm3) < 227 MPa. Flecha = 1.9 mm (L/531). ATENDE.
Carga concentrada de 2,5 kN no meio do degrau (NBR 6120): a cantoneira sozinha NAO resistiria
(Md = 0.94 kNm -> 1442 MPa). Quem resiste e o espelho de madeira (20 x 155 mm, de pe), parafusado nas duas cantoneiras:
rigidez EI do espelho = 74 kN.m2 contra 2.8 kN.m2 da cantoneira -> o espelho recebe 96% do momento.
Tensao no espelho = 11.3 MPa < 16 MPa (f_md de madeira C40). ATENDE.
Consequencia: o espelho e peca estrutural. Parafusar nas duas cantoneiras a cada 250 mm; nao montar degrau sem espelho.

5.2 Painel de patamar, 20 mm, apoiado em vigas a cada ~525 mm

Carga distribuida: flecha = 5 q L4 / 384 E I = 0.33 mm. Pessoa de 1 kN no meio do vao (faixa de 300 mm): 1.26 mm. Limite L/350 = 1.5 mm. ATENDE.

5.3 Poste do gradil (tubo 30x30x2, altura 1,07 m, espacamento maximo 1,5 m)

Carga horizontal no corrimao: 1,0 kN/m (adotado; confirmar na NBR 6120:2019 e NBR 14718 o valor aplicavel a area privativa).
Md = 1,5 x 1,0 x 1,5 m x 1,07 m = 2.41 kNm; W = 1.96 cm3 -> sigma = 1228 MPa >> 227 MPa.
NAO ATENDE como poste isolado (5,4 vezes acima). O modulo resistente necessario e 10.6 cm3:
tubo 50x50x4,75 (W = 11.9 cm3) ou 60x60x3 (W = 12.4 cm3) nos postes de canto e de extremidade, soldados na longarina,
ou corrimao ancorado nas paredes nas pontas (reduz o vao). O gradil trabalha em conjunto (cantos, travessas), o que alivia,
mas isso nao foi modelado. As secoes do gradil foram adotadas a partir do desenho arquitetonico (poste de 3 cm).

5.4 Soldas

Filete continuo, garganta 3 mm, no contorno de cada face de contato. Junta tipica 100x100: 400 mm de cordao.
Resistencia: 400 x 3 x 0,6 x 415 / 1,35 = 221 kN por junta (eletrodo E70). Os esforcos nas juntas das longarinas sao de poucos kN (reacoes no item 3). Folga ampla.
Ligacao da viga oculta na viga de parede (topo 200x50): 500 mm de cordao; momento de calculo ~5 kNm -> binario de ~25 kN nas mesas. ATENDE.
A parede do tubo de 3 mm da viga de parede, na regiao onde a viga oculta chega, sofre flexao local: prever luva em cada furo e, se o
engenheiro julgar necessario, enrijecedor interno ou tubo de 4,75 mm nesse trecho.

5.5 Chumbadores (aco)

Barra roscada M12 classe 8.8: As = 84,3 mm2 -> tracao de calculo 0,75 x 84,3 x 800 / 1,35 = 37 kN; corte 0,4 x 84,3 x 800 / 1,35 = 20 kN.
O aco nao governa: quem limita e o substrato (graute do tijolo ecologico), cuja capacidade so se conhece por ensaio.

5.6 Longarina em zigue-zague

Verificada no modelo global (cada trecho e cada canto sao barras e nos do portico).
Tensao maxima nos lances: ver item 3 (maximo global 67 MPa).

6. Alternativas para aliviar os chumbadores

Mesmo modelo, mudando so os patamares 1 e 2 da escada 1. Colunas: flecha total (mm), tensao maxima (MPa) e tracao no chumbador
mais carregado de cada patamar (kN), para chumbador de 10 e de 40 kN/mm.

Variante	flecha 10	tensao 10	P1 max 10	P2 max 10	flecha 40	tensao 40	P1 max 40	P2 max 40
Projeto atual: 3 por celula azul, 3 na coluna	2.5	65	4.0	3.6	2.0	63	8.1	6.0
Anterior: 2 por celula, 2 na coluna	2.6	67	4.6	3.7	2.1	63	9.3	6.3
Grade: +2 vigas ocultas, meio e borda 200x50	2.4	61	4.2	3.4	1.8	53	9.0	5.4
Pilarete sob o canto interno de P1 e P2	1.3	55	1.5	1.2	1.0	45	2.4	2.1

Leitura

Celulas lidas da planta de modulacao da alvenaria (tijolo 15x30, uma celula a cada 150 mm). Azul = graute; amarelo = conduite
eletrico (PROIBIDO furar); branco = vazia. Distancias a partir da face da coluna do canto:
parede do patamar 1: graute em 75, 225 e 975 mm; conduite em 375, 825 e 1125; vazias 525 e 675.
parede do patamar 2: graute em 75, 225, 975, 1125 mm e, pela longarina do lance E, 1275, 1425 e 1575; conduite em 375.
Barras e flecha atendem com folga. O que ainda nao fecha com os 5 kN adotados, na hipotese de chumbador rigido, e o chumbador
de cima da celula de 975 mm no patamar 1, unica perto da viga oculta. No patamar 2 ha duas celulas ali e a situacao e melhor.
Ja estao 3 chumbadores por celula azul e 3 na coluna (o maximo que cabe). Decisao do cliente: sem pilares, sem tirantes e sem graute novo.

Recomendacao do autor do estudo

1) Ensaio de arrancamento antes de fabricar: 2 chumbadores por parede, em celulas grauteadas, ate 15 kN ou ruptura, medindo o deslocamento.
Se o chumbador resistir a 8,5 kN de calculo no patamar 1 (6 kN no 2), o projeto atual fecha sem mudanca.
2) Se resistir menos: testar barra M16 (mais aderencia no graute) e, com a curva carga x deslocamento, refazer o calculo com a rigidez medida.
3) Conferir na obra a posicao das celulas (o desenho foi lido de uma imagem da planta; tolerancia de leitura ~20 mm).
4) Trocar os postes de canto e de extremidade do gradil por 50x50x4,75 ou 60x60x3.

Limitacoes deste estudo

- E um pre-dimensionamento feito por programa proprio, nao por software comercial validado; serve para conferencia, nao para execucao.
- A rigidez e a resistencia do chumbador em graute de tijolo ecologico foram ESTIMADAS (10 a 40 kN/mm; 5 kN). Nao ha dado de ensaio.
- A parede, as vigas de concreto e as colunas grauteadas foram tomadas como rigidas e resistentes; a verificacao delas nao faz parte deste estudo.
- Nao foram verificados: vibracao, fadiga, flambagem local dos tubos, fogo, e o comportamento conjunto do gradil.
- Posicao dos furos grauteados, espessura real dos tubos e fy do aco precisam ser confirmados na obra e na compra.

Arquivos

analise_final.py (modelo e resultados deste relatorio), analise.py (solver), escada.py (geometria), detalhes.py (verificacao de montagem),
pranchas.py (projeto-1, -2 e -3 .pdf), relatorio.py (este PDF). Todos reproduziveis: python relatorio.py.