
Abordagem Manual e Computacional do *Stringer and Panel Method* para Análise e Dimensionamento de Paredes em Concreto Estrutural

Manual and Computational Approach of the Stringer and Panel Method for the Analysis and Design of Structural Concrete Walls

Rafael Alves de Souza ¹
Dionisio Palharini Junior ²

Resumo: Os benefícios promovidos pela era computacional estão fazendo com que o cálculo manual seja cada vez mais deixado de lado, o que por sua vez pode representar uma grande imprudência. Acidentes estruturais ocorridos nos últimos anos têm demonstrado que verificações manuais simples seriam suficientes para evitar sinistros ocorridos com estruturas inteiramente dimensionadas e detalhadas com o auxílio de computadores e softwares específicos, revelando que o cálculo computacional quando conduzido por engenheiros pouco afetos a verificações manuais pode ser extremamente perigoso. É certo que, com o avanço dos métodos computacionais, aumentou-se também a complexidade das estruturas, de maneira que em muitos casos tornou-se difícil recorrer a verificações manuais que possam certificar a qualidade dos resultados numéricos. Nesse contexto, o presente artigo tem por objetivo apresentar uma abordagem manual do *Stringer and Panel Method*, demonstrando que a referida ferramenta pode ser bastante eficaz nos procedimentos de análise e dimensionamento de paredes em concreto estrutural. Finalmente, exemplos são apresentados e validados com o auxílio de análises não-lineares conduzidas com o programa ATENA2D, demonstrando que as abordagens manuais e computacionais sempre devem ser complementares e nunca isoladas.

Palavras-chave: Stringer and Panel Method, Análise, Dimensionamento, Paredes, Concreto

Abstract: *The benefits promoted by the computer are causing the manual calculation to be increasingly left out, which in turn may be a dangerous imprudence. Structural failures in recent years have shown that simple manual checks would be sufficient to prevent accidents occurred in structures fully dimensioned using computers. This fact reveals that computational calculations may be harmful when conducted by engineers with little affection by hand calculations. Undoubtedly, with the advancement of the computational methods, the complexity of the structures also increased and, in many cases, there are substantial difficulties for using manual checks in order to ensure the validity of the numerical results obtained. In this context, this paper aims at presenting a manual approximation for the "Stringer and Panel Method", demonstrating that this tool can be a very effective procedure for analysis and design of wall-type structures. Finally, a single example is presented and validated by means of the non-linear analysis procedures available in the package software ATENA2D. Results demonstrated that hand calculations and computational approach should always be complementary rather than conducted in an isolated way.*

Keywords: *Stringer and Panel Method, Analysis, Design, Walls, Concrete*

¹ Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Brasil, email :rsouza@uem.br

² Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Brasil, email :dionisiopalharini@gmail.com

1 Introdução

O *Stringer and Panel Method* (SPM) vem sendo utilizado pela indústria aeronáutica desde o começo da década 30 e as primeiras aplicações dentro da engenharia civil deram-se com a publicação dos trabalhos de Lundgren (1949), Argyris e Kelsey (1960), Nielsen (1971), Rabbat e Collins (1978) e Kaern (1979).

O método consiste em estabelecer um conjunto de barras prismáticas horizontais e verticais (*stringers*) estabilizadas por painéis internos (*panels*). Nesse sistema, as barras prismáticas absorvem forças normais de tração ou de compressão, enquanto os painéis ficam submetidos a esforços de membrana, conforme ilustra a Figura 1.

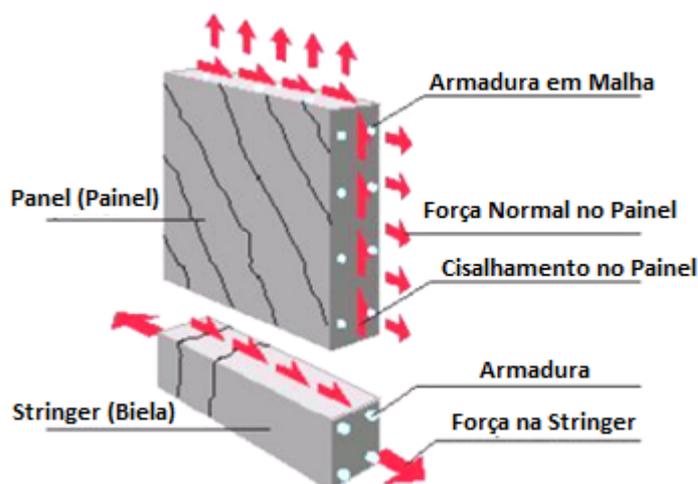


Figura 1. Elementos utilizados no *Stringer and Panel Method*

De acordo com Hauksdóttir (2007), o método é baseado no Limite Inferior da Teoria da Plasticidade, isto é, a capacidade de carga esperada de uma estrutura dimensionada com o auxílio de tal método será igual ou inferior a carga de ruína real. Ainda de acordo com o pesquisador, o método pode ser utilizado em qualquer material onde a Teoria da Plasticidade seja válida, ou seja, materiais em que as deformações elásticas são muito menores do que as deformações plásticas numa situação extrema.

O CEB-FIP Model Code 1990 (1993) faz referências ao *Stringer-and-Wall Method*, enquanto o código dinamarquês DS411 (1999) apresenta diretrizes sobre a aplicação do *Stringer Method*. Na realidade, o *Stringer and Panel Method*, o *Stringer-and-Wall Method*, o *Stringer Method* e o *Boom-Panel System* nada mais são do que o mesmo método.

O *Stringer and Panel Method* é normalmente formulado baseando-se no Método dos Deslocamentos e a sua implementação computacional pode ser feita com grandes facilidades, utilizando os mesmos conceitos de análise matricial contidos no Método dos Elementos Finitos. Um programa computacional bastante interessante foi implementado no ambiente do programa AutoCAD por Blaauwendraad e Hoogenboom (1996). Trata-se do programa SpanCAD e a ferramenta pode ser livremente obtida na rede mundial de computadores (<http://www.mechanics.citg.tudelft.nl/spancad/>).

A Figura 2, extraída do trabalho de Blaauwendraad e Hoogenboom (2002), procura ilustrar a modelagem de uma viga-parede utilizando o *Stringer and Panel Method*. Conforme pode-se observar, a viga-parede (Figura 2(a)) foi discretizada em uma série de *stringers* horizontais e verticais preenchidas internamente por *panels* (Figura 2(b)). A partir da envoltória

de resultados para vários carregamentos previamente definidos (Figura 2 (c)), pôde-se então definir uma proposta de armação para a referida viga-parede (Figura 2 (d)).

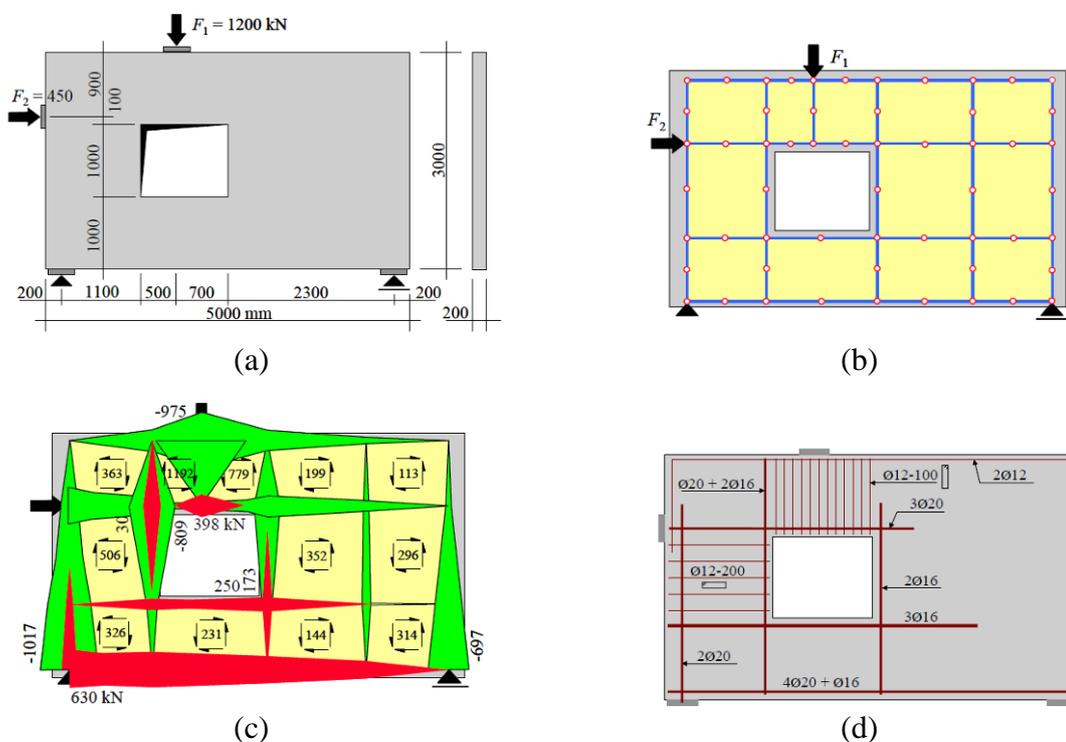


Figura 2. (a) Dimensões e condições de contorno de viga-parede, (b) modelo proposto, (c) envoltória de resultados obtidos para diversas combinações de carregamento e (d) panorama de armação proposto (Fonte: Blaauwendraad e Hoogenboom (2002))

Dentre as publicações disponíveis sobre o método, merecem destaque os trabalhos desenvolvidos por Blaauwendraad e Hoogenboom (1996), Bontempi et al. (1998), Simone (1998), Hoogenboom (1998), Simone et al. (1999), Biondini et al. (1999) e Simone e Malerba (2001) e mais recentemente Blaauwendraad (2018). Infelizmente, em todos os trabalhos citados anteriormente, a abordagem é sempre do ponto de vista computacional, deixando-se de lado as grandes potencialidades que o método possui quando abordado do ponto de vista manual, conforme será visto a seguir.

2 Abordagem manual do *Stringer and Panel Method*

Na literatura observa-se pouca menção à aplicação do *Stringer and Panel Method* via procedimentos manuais. As poucas informações que serviram de base para a metodologia que será aqui proposta, foram desenvolvidas com base nos trabalhos publicados por Hauksdóttir (2007), Jensen (2010) e Nielsen e Hoang (2011). Além disso, os autores do presente trabalho já vêm efetuando outras investigações no assunto, conforme pode-se constatar em Mello & Souza (2016).

Observa-se que os dinamarqueses vêm aplicando o método há tempos, inclusive com recomendações pela norma DS411 (1999). No entanto, mesmo quando pesquisado o termo *Stringermetoden*, nome do método em dinamarquês, apenas alguns poucos trabalhos são encontrados. Dessa maneira, o presente artigo procura desenvolver uma estratégia de aplicação do referido método, discretizando etapas sistemáticas para obtenção dos esforços e armaduras.

De maneira a ilustrar o procedimento de cálculo manual, será tomado como exemplo inicial a viga-parede ilustrada na Figura 3. O processo se inicia com o cálculo das reações de apoio, seguido pela introdução de *stringers* verticais sob os carregamentos. Adicionalmente, é feita a introdução de *stringers* horizontais e verticais nas regiões de fronteira da estrutura, objetivando constituir regiões fechadas que serão definidas pelos elementos do tipo *panel*. Nas regiões de encontro entre as *stringers* são definidos nós, que posteriormente serão úteis para a identificação dos elementos introduzidos.

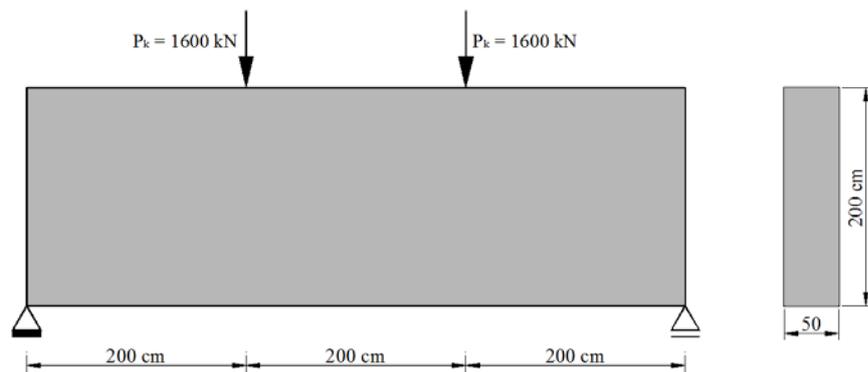


Figura 3. Viga-parede utilizada para ilustração do procedimento manual com o *Stringer and Panel Method*

A seguir, de maneira a identificar as *stringers* do modelo, pode-se imaginar a estrutura discretizada em um sistema constituído por eixos horizontais (definidos por letras maiúsculas consecutivas) e eixos verticais (definidos por números consecutivos). Os eixos verticais são definidos da esquerda para direita enquanto os eixos horizontais são definidos de baixo para cima, conforme ilustra a Figura 4.

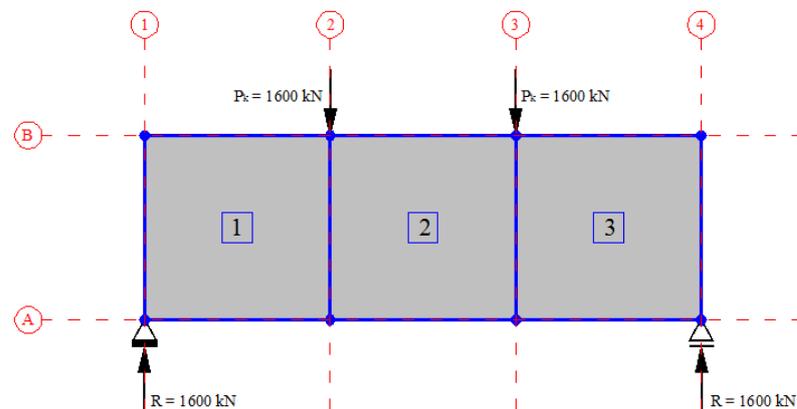


Figura 4. Viga-parede discretizada com a utilização de elementos *stringers* e *panels*

Através dessa sistemática, as *stringers* podem ser identificadas na direção horizontal (B,1,2; B,2,3; B,3,4; A,1,2; A,2,3 e A,3,4) e na direção vertical (1,A,B; 2,A,B; 3,A,B e 4,A,B), de maneira rápida, sem necessidade de numeração dos nós. Os *panels*, por sua vez, são numerados consecutivamente da esquerda para direita e de baixo para cima. Observa-se que o

modelo ilustrado na Figura 4 é constituído por 10 elementos *stringers* e apenas 3 elementos *panels*. Caso queira-se aumentar a precisão do modelo, pode-se aumentar o número de elementos seguindo a metodologia descrita anteriormente. No entanto, alerta-se que com o aumento do número de elementos, haverá a tendência de se obter modelos estaticamente indeterminados.

A ideia do *Stringer and Panel Method* é de que as tensões de cisalhamento e as tensões normais podem ser calculadas considerando apenas as condições de equilíbrio. As cargas e as reações são definidas como cargas concentradas atuantes nos nós ou como tensões de cisalhamento atuantes no interior dos *panels*. Devido ao fato da tensão de cisalhamento ser constante dentro dos *panels*, as forças nas redondezas das *stringers* terão variação linear entre os nós.

De maneira a se interpretar adequadamente os resultados obtidos é importante estabelecer um sistema de convenção para as forças atuantes. A Figura 5 estabelece os sentidos arbitrados como positivos, tanto para os elementos do tipo *panel* quanto para os elementos do tipo *stringer*.

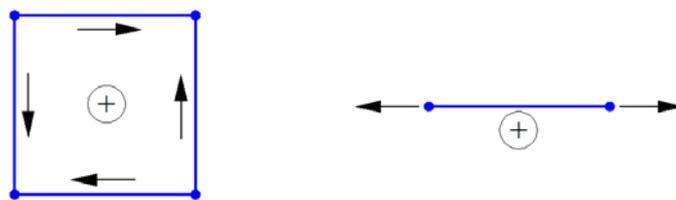


Figura 5. Convenção positiva para os elementos *panel* e *stringer*

O cálculo sempre deve ser iniciado pelos *panels* estaticamente determinados, sendo que uma vez obtidas as forças (kN/m) ou as tensões (kN/cm²), pode-se imediatamente determinar as forças atuantes nas *stringers* adjacentes. A Figura 6 ilustra o procedimento de cálculo da força de cisalhamento atuante no elemento *panel* 1, a partir das reações de apoio.

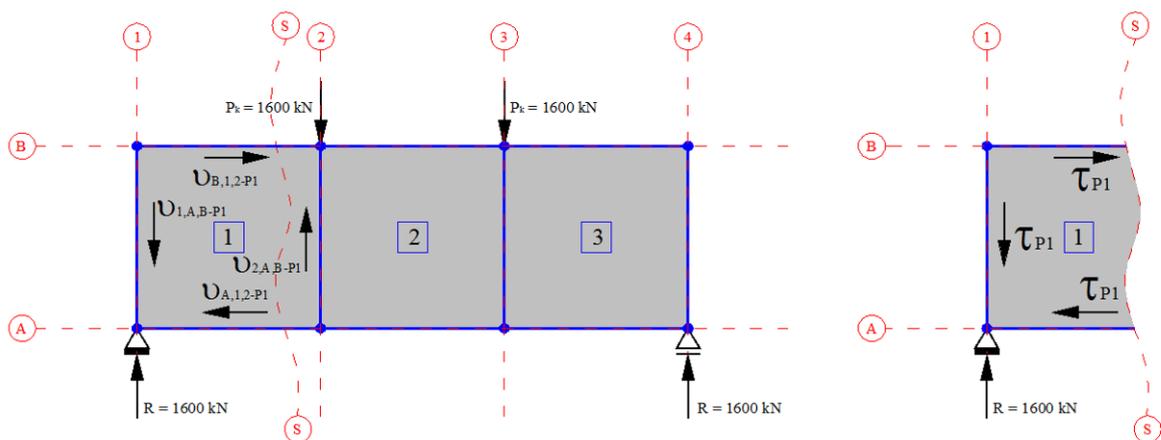


Figura 6. Determinação da força de cisalhamento no elemento *panel* 1

Inicialmente é feita uma seção vertical (SS) passando pelo *panel* 1 e assume-se que a distribuição de forças no interior do referido painel seja dada pela distribuição especificada pela

convenção positiva. Em seguida, pode-se fazer um estudo específico na seção (SS), nomeadamente da força cisalhante $v_{1,A,B-P1}$ atuante na interface com a *stringer* 1,A,B do *panel* 1. Dessa maneira, pode-se concluir que a força cisalhante no *panel* 1 será dada por $v_{1,A,B-P1} = R/h = 1600 \text{ kN} / 2 \text{ m} = 800 \text{ kN/m}$ enquanto a tensão de cisalhamento será igual a $\tau_{P1} = 1600 / (200.50) = 0,16 \text{ kN/cm}^2 = 1,6 \text{ MPa}$.

Uma vez que a tensão no painel é constante com $\tau_{P1} = 1,6 \text{ MPa}$ e, tendo-se em vista que o *panel* é quadrado, deduz-se que as forças cisalhantes na horizontal ($v_{B,1,2-P1}$ e $v_{A,1,2-P1}$) também serão iguais a 800 kN/m , com o mesmo sentido indicado na Figura 5. Caso o *panel* não fosse quadrado, as forças de cisalhamento na horizontal deveriam variar, de maneira a preservar a tensão de cisalhamento constante de $1,6 \text{ MPa}$ no interior do elemento.

A Figura 7 ilustra o procedimento para determinação da tensão atuante no *panel* 3. Conforme pode-se observar, para que ocorra o equilíbrio do painel com a *stringer* 4,A,B, a força cisalhante $v_{4,A,B-P3}$ deverá ter sentido contrário àquele indicado pela convenção positiva do painel. Dessa maneira a força cisalhante $v_{4,A,B-P3}$ deverá ser de cima para baixo, de maneira a equilibrar a reação de apoio. Assim, conclui-se que $v_{4,A,B-P3} = -R/h = -1600 \text{ kN} / 2 \text{ m} = -800 \text{ kN/m}$ enquanto a tensão será igual a $\tau_{P3} = -1600 / (200.50) = -0,16 \text{ kN/cm}^2 = -1,6 \text{ MPa}$, também constante dentro do *panel* 3.

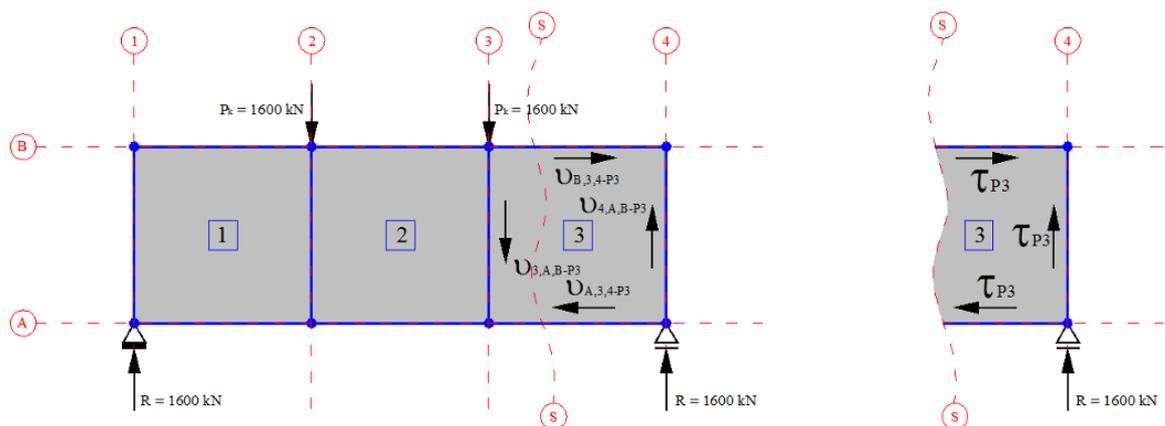


Figura 7. Determinação da força de cisalhamento no *panel* 3

A determinação das forças cisalhantes atuantes no *panel* 2 é feita tomando-se por base a Figura 8, a partir do equilíbrio da força $v_{2,A,B-P2}$ com todas as forças externas que causam cisalhamento na seção. Dessa maneira, pode-se constatar que a força cisalhante $v_{2,A,B-P2}$ será nula, uma vez que a reação $R_k = 1600 \text{ kN}$ equilibra a força concentrada $P_k = 1600 \text{ kN}$. Dessa maneira, a tensão τ_{P2} será nula e constante dentro do *panel* 2.

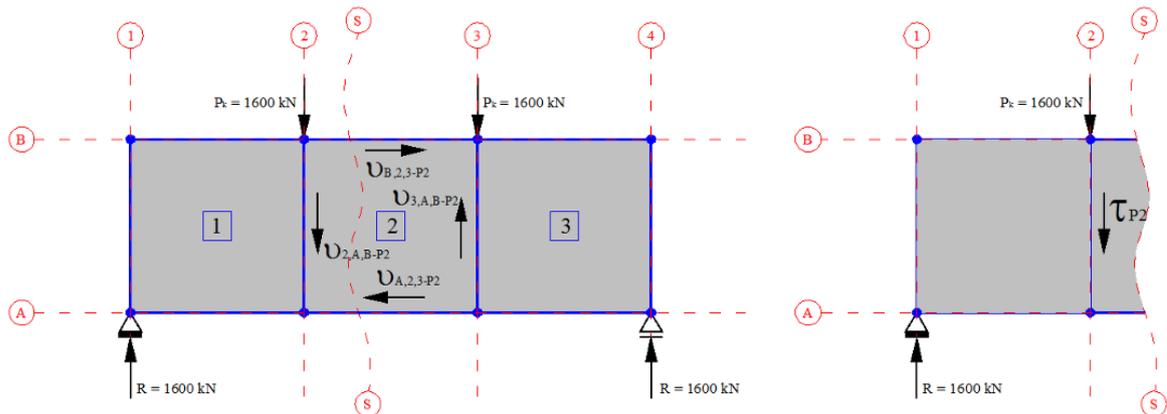


Figura 8. Determinação da força de cisalhamento no *panel 2*

Conhecidas as tensões e as forças de cisalhamento atuantes internamente nos *panels*, pode-se então determinar as forças normais atuantes nas *stringers* do modelo. Assumindo variação linear entre os nós, as forças normais atuantes são apresentadas na Figura 9, sendo que as forças normais em azul representam compressão e as forças normais em vermelho representam tração. Observa-se que as tensões de cisalhamento nos *panels* são apresentadas já com a atualização dos sentidos de atuação.

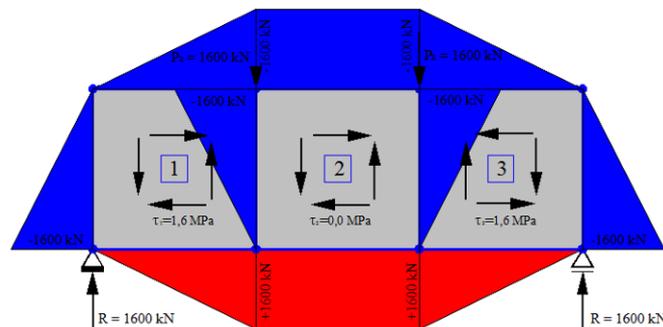


Figura 9. Determinação da força normais nas *stringers* do modelo

A Figura 10 ilustra uma estrutura sujeita ao problema de indeterminação estática tanto para seções estabelecidas na direção vertical quanto na direção horizontal. Conforme pode-se observar, através da definição de seções horizontais (SH1, SH2 e SH3) e verticais (SV1, SV2 e SV3) situadas entre os eixos de identificação da estrutura, pode-se obter uma série de equações relacionando as tensões de cisalhamento atuantes nos painéis.

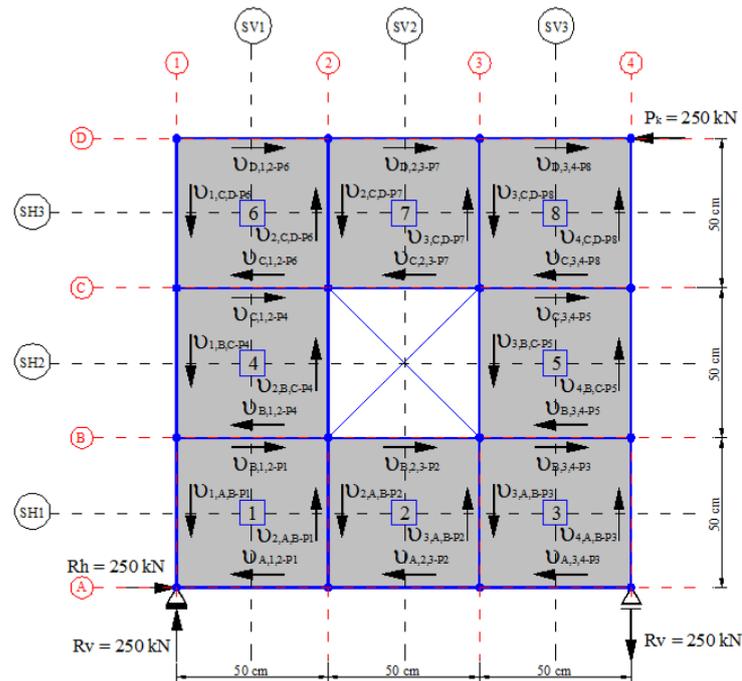


Figura 10. Estrutura sujeita a indeterminação estática nas direções horizontais e verticais

Conforme pode-se observar pela Figura 11, fazendo-se o equilíbrio acima das seções horizontais (SH) e à esquerda das seções verticais (SV), pode-se chegar a um sistema de 6 equações e 8 incógnitas, em termos de forças cisalhantes (kN/m), conforme a seguir:

$$\text{Seção SV1} \rightarrow U_{1,A,B-P1} \cdot 0,5 + U_{1,B,C-P4} \cdot 0,5 + U_{1,C,D-P6} \cdot 0,5 = 250 \text{ kN}$$

$$\text{Seção SV2} \rightarrow U_{2,A,B-P2} \cdot 0,5 + U_{2,C,D-P7} \cdot 0,5 = 250 \text{ kN}$$

$$\text{Seção SV3} \rightarrow U_{3,A,B-P3} \cdot 0,5 + U_{3,B,C-P5} \cdot 0,5 + U_{3,C,D-P8} \cdot 0,5 = 250 \text{ kN}$$

$$\text{Seção SH3} \rightarrow U_{D,1,2-P6} \cdot 0,5 + U_{D,2,3-P7} \cdot 0,5 + U_{D,3,4-P8} \cdot 0,5 = 250 \text{ kN}$$

$$\text{Seção SH2} \rightarrow U_{C,1,2-P4} \cdot 0,5 + U_{C,3,4-P5} \cdot 0,5 = 250 \text{ kN}$$

$$\text{Seção SH1} \rightarrow U_{B,1,2-P1} \cdot 0,5 + U_{B,2,3-P2} \cdot 0,5 + U_{B,3,4-P3} \cdot 0,5 = 250 \text{ kN}$$

O problema de indeterminação estática pode ser resolvido adotando-se hipóteses para as forças de cisalhamento atuantes em alguns *panels*. Pode-se assumir, por exemplo, que a reação vertical de 250 kN atuante à esquerda da seção vertical SV2 será igualmente distribuída entre as forças cisalhantes $U_{2,C,D-P7}$ e $U_{2,A,B-P2}$. Dessa maneira, pode-se concluir que $U_{2,C,D-P7} = U_{2,A,B-P2} = 250 \text{ kN/m}$.

Da mesma maneira, pode-se assumir que a reação horizontal de 250 kN, atuante abaixo da seção SH2, será igualmente distribuída entre as forças de cisalhamento $U_{B,1,2-P4}$ e $U_{B,3,4-P5}$. Dessa maneira, $U_{B,1,2-P4} = U_{B,3,4-P5} = 250 \text{ kN/m}$, de maneira que as forças cisalhantes atuantes nos painéis 2, 4, 5 e 7 ficam completamente determinadas.

Definindo-se, por exemplo, que a reação vertical de 250 kN à esquerda da seção SV1 será distribuída entre as forças $U_{1,A,B-P1}$ e $U_{1,B,C-P4}$ e $U_{1,C,D-P6}$ e sabendo-se que a força de cisalhamento no *panel* 4 já está definida e responderá por 250 kN/m, pode-se absorver a diferença igualmente entre os *panels* 1 e 6, objetivando garantir o equilíbrio. Dessa maneira, pode-se chegar à conclusão de que $U_{1,A,B-P1} = U_{1,C,D-P6} = 125$ kN/m.

Efetuando o procedimento anterior e assumindo que a espessura para a estrutura apresentada na Figura 10 seja igual a 20 cm, pode-se chegar a um campo de tensões de cisalhamento estaticamente admissível para a estrutura, conforme ilustra a Figura 11.

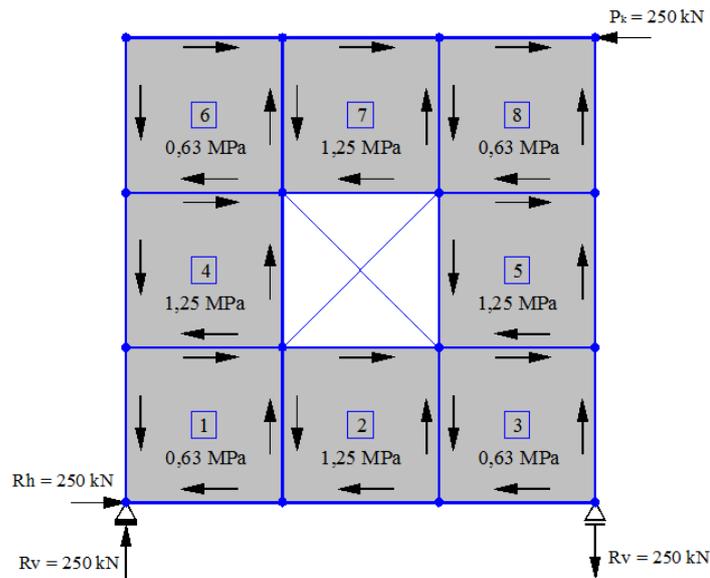


Figura 11. Tensões de cisalhamento estaticamente admissíveis para estrutura em análise

A Figura 12, ilustra as forças nas *stringers* e as tensões nos *panels* da estrutura analisada utilizando a metodologia manual sugerida.

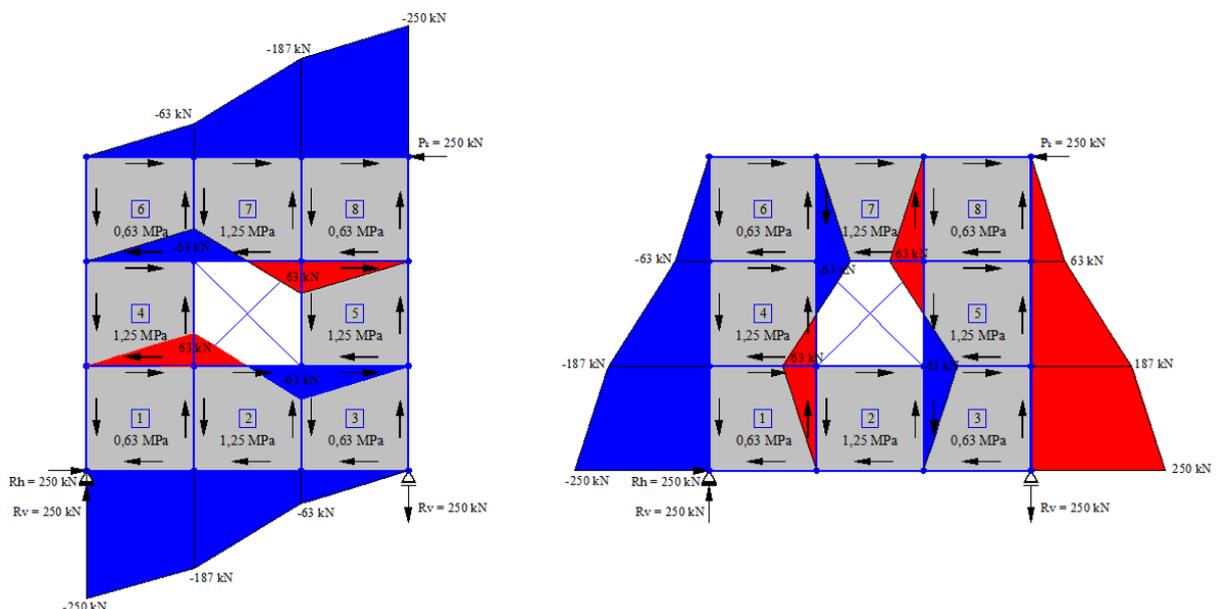
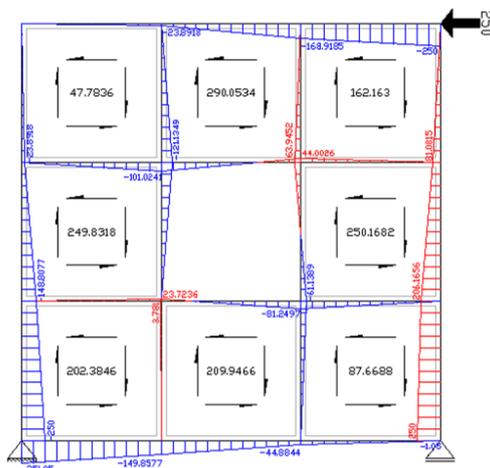


Figura 12. Esforços nas *stringers* (kN) e nos *panels* (MPa) da estrutura em análise

A Figura 13 apresenta os esforços obtidos utilizando o programa SpanCAD, demonstrando que a solução baseada unicamente em condições de equilíbrio ilustrada na Figura 12 se aproxima de maneira bastante razoável da solução real baseada na rigidez efetiva dos elementos *stringers* e *panels* através do Método dos Deslocamentos. Para o caso em questão, considerou-se *stringers* com seção transversal de 20 x 20 cm e os *panels* com 20 cm de espessura.



Painel	Tensão de Cisalhamento (MPa)	
	SpanCAD	Método Manual
1	1,01	0,63
2	1,04	1,25
3	0,43	0,63
4	1,24	1,25
5	1,25	1,25
6	0,23	0,63
7	1,45	1,25
8	0,81	0,63

Figura 13. Esforços nas *stringers* (kN) e nos *panels* (kN/m) da estrutura em análise utilizando o programa SpanCAD e comparação entre o método numérico e o método manual

De posse dos esforços característicos atuantes no modelo, pode-se então partir para o dimensionamento da estrutura. Os elementos do tipo *panel* são dimensionados recorrendo-se à formulação usual para elementos de membrana, enquanto os elementos do tipo *stringer* são dimensionados da mesma maneira que as escoras e tirantes do Método das Bielas. A Tabela 1 ilustra o dimensionamento dos *panels* considerando todos os elementos com 20 cm de espessura, enquanto a Tabela 2 ilustra o dimensionamento das *stringers*, considerando os elementos com seção 20 x 20 cm, concreto C20, aço CA50 e os esforços obtidos pelo método manual.

Tabela 1 - Dimensionamento dos elementos do tipo *panel* da estrutura em análise

<i>Panel</i>	τ_k (MPa)	σ_c (MPa)	f_e (MPa)	ρ_x, ρ_y (%)	$A_{s,necessário}$	$A_{s,adotado}$
1	0,63	-1,76	-12,00	0,20	2 ϕ 6,3 mm c/ 14 cm	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm
2	1,25	-3,50	-12,00	0,40	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm
3	0,63	-1,76	-12,00	0,20	2 ϕ 6,3 mm c/ 14 cm	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm
4	1,25	-3,50	-12,00	0,40	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm
5	1,25	-3,50	-12,00	0,40	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm
6	0,63	-1,76	-12,00	0,20	2 ϕ 6,3 mm c/ 14 cm	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm
7	1,25	-3,50	-12,00	0,40	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm
8	0,63	-1,76	-12,00	0,20	2 ϕ 6,3 mm c/ 14 cm	2 ϕ 8,0 mm c/ 12 cm

Fonte: Autoria própria (2019)

Tabela 2 - Dimensionamento dos elementos do tipo *stringer* da estrutura em análise

	<i>Stringer</i>	Força Máxima	N_k (kN)	σ_d (MPa)	$0,85.f_{cd}.A_c$ (kN)	A_{st} (cm ²)	$A_{st,adotado}$
Stringers Horizontais	A	Compressão	-250	-8,75	-486	-	-
		Tração	0	0,00	-	-	-
	B	Compressão	-63	-2,25	-486	-	-
		Tração	+63	+2,25	-	2,02	3 ϕ 10 mm
	C	Compressão	-63	-2,25	-486	-	-
		Tração	+63	+2,25	-	2,02	3 ϕ 10 mm
	D	Compressão	-250	-8,75	-	-	-
		Tração	0	0,00	-	-	-
Stringers Verticais	1	Compressão	-250	-8,75	-486	-	-
		Tração	0	0,00	-	-	-
	2	Compressão	-63	-2,25	-486	-	-
		Tração	+63	+2,25	-	2,02	3 ϕ 10 mm
	3	Compressão	-63	-2,25	-486	-	-
		Tração	+63	+2,25	-	2,02	3 ϕ 10 mm
	4	Compressão	0	0,00	-	-	-
		Tração	+250	+8,75	-	8,04	7 ϕ 12 mm

Fonte: Autoria própria (2019)

Afim de se apresentar de maneira clara a sistemática de aplicação do *Stringer and Panel Method* via procedimentos manuais, foi desenvolvido um fluxograma que sistematiza a completa apresentada anteriormente, conforme ilustra a Figura 14.

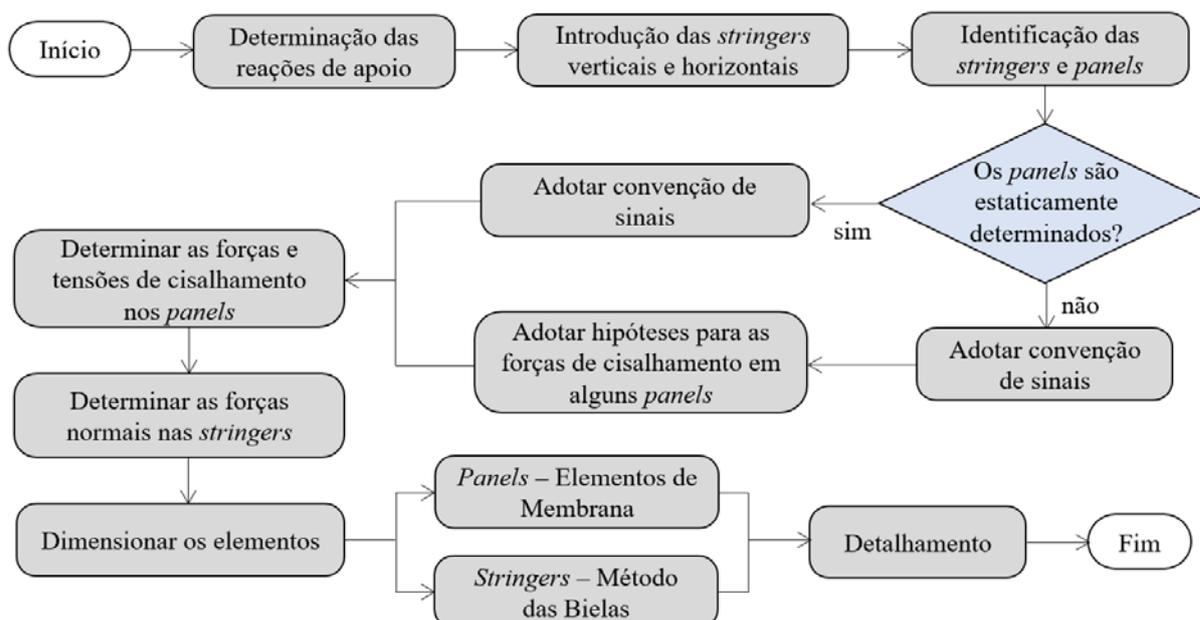


Figura 14. Fluxograma para utilização do *Stringer and Panel Method* via procedimentos manuais

3 Análise Não-Linear do Dimensionamento Efetuado

De maneira a comprovar a performance do procedimento manual de dimensionamento ora aqui proposto, foi conduzida uma análise não-linear da estrutura dimensionada utilizando-se o programa ATENA2D. Para maiores informações a respeito do referido programa e suas potencialidades, recomenda-se a leitura de Cervenka e Cervenka (2003, 2005).

Basicamente assumiu-se resistência de 20 MPa para o concreto à compressão, resistência de 500 MPa para o aço à tração (modelo bilinear) e método de solução de Newton-Raphson com tolerâncias de erro de 0,01 para os deslocamentos e 0,0001 para a energia. Empregou-se ainda o modelo de fissuração distribuída do tipo *rotating crack model*, apesar do modelo baseado no *fixed crack model* também ter sido testado.

Objetivando simular os procedimentos de um usuário convencional, procurou-se definir apenas a resistência à compressão do concreto e a resistência à tração das armaduras, de maneira que os inúmeros parâmetros necessários à análise não-linear foram todos definidos automaticamente pelo programa.

A Figura 15(a) ilustra o modelo de elementos finitos utilizado, a Figura 15(b) ilustra a região das primeiras fissuras e a Figura 15(c) ilustra o panorama de fissuração observado na carga limite, somente para fissuras com abertura superior a 0,3 mm. Conforme pode-se observar, as primeiras fissuras surgiram para a carga de 72 kN enquanto a carga limite deu-se em 269 kN. Deve-se observar que a carga limite não pode ser considerada uma carga de ruptura uma vez que não se verificou escoamento das armaduras e nem o esmagamento do concreto. Utilizando o *fixed crack model* registrou-se uma carga limite de 274 kN, também sem a ocorrência de escoamentos ou esmagamentos.

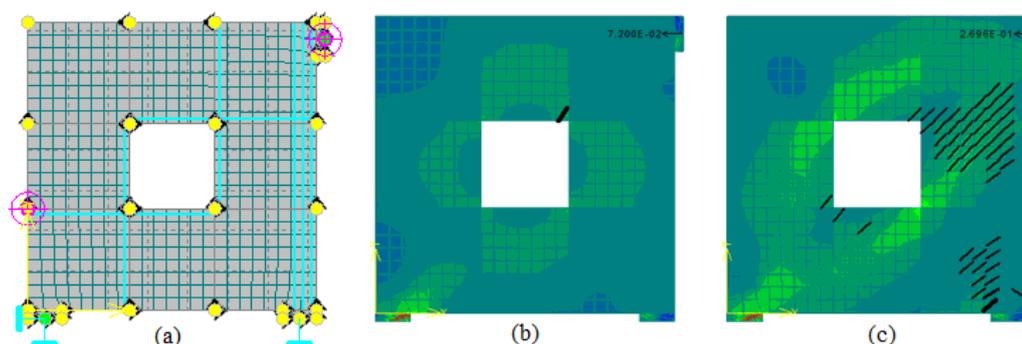


Figura 15. (a) Estrutura discretizada no programa ATENA2D, (b) fissura inicial para carga de 72 kN e (c) panorama de fissuração para carga de ruína de 269 kN.

As Figuras 15(a) e 15(b) ilustram ainda as tensões de cisalhamento na estrutura e, conforme pode-se observar, as regiões mais solicitadas são idênticas àquelas obtidas com o *Stringer and Panel Method*, ou seja, as regiões dos *panels* 2, 4, 5 e 7. A máxima tensão registrada nas armaduras discretas foi de 395 MPa e ocorreu nas armaduras verticais logo acima do apoio à direita da estrutura (região da *stringer* 4). Ainda na região logo acima do apoio à direita da estrutura (região da *stringer* 4), verificou-se as maiores tensões na armadura em malha, com valores de 444 MPa na direção x e 489 MPa na direção y. A máxima tensão de compressão verificada no concreto ocorreu junto ao apoio esquerdo, com um valor de aproximadamente 15,14 MPa.

Conforme mencionado, a partir da carga de 269 kN não foi mais possível obter convergência, mesmo alterando os métodos de solução e diminuindo os incrementos de carga, demonstrando assim que quando o cisalhamento é dominante a análise não-linear deve ser sempre analisada com grande prudência. O máximo deslocamento horizontal registrado para esse carregamento e para um ponto de controle situado na divisa entre os *panels* 1 e 4 foi de aproximadamente 2,38 mm.

A Figura 16 ilustra alguns resultados obtidos utilizando o módulo de análise não-linear do programa SpanCAD. Conforme pode-se observar pela Figura 16(a), o panorama e as regiões de fissuração se aproximam bastante dos resultados obtidos com o programa ATENA2D (Figura 15(c)). Por outro lado, a ruptura da estrutura deu-se para uma carga próxima a 400 kN, com um deslocamento máximo entre 2 e 3 mm, conforme ilustra a Figura 15 (b).

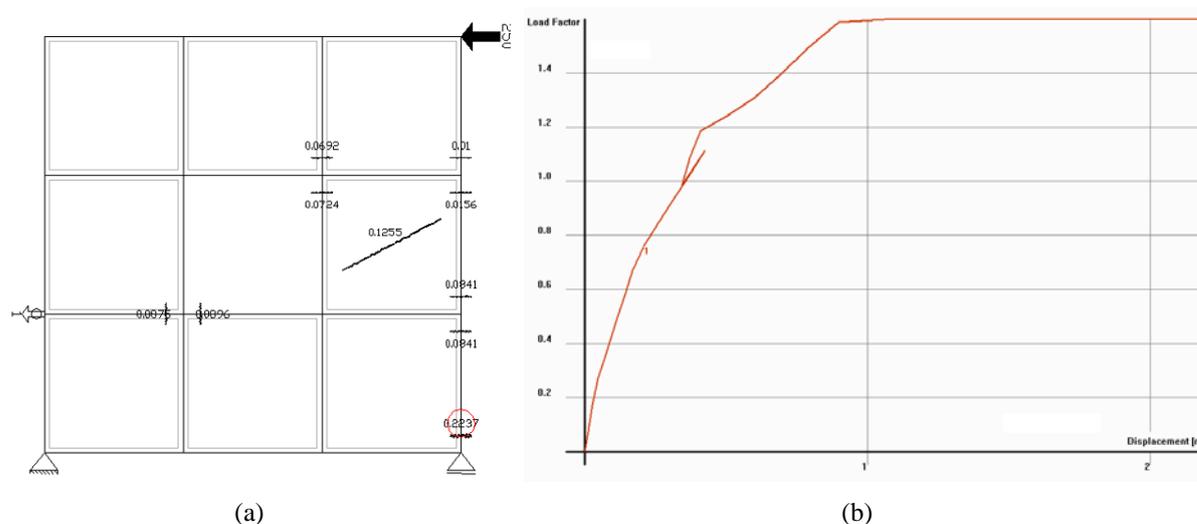


Figura 16. (a) Fissuras para a carga de 250 kN e (b) comportamento carga x deslocamento utilizando o programa SpanCAD.

Conforme pode-se observar na Figura 16, a carga de ruptura obtida pelo programa SpanCAD se aproxima bastante da carga de ruptura esperada do ponto de vista teórico, isto é, 402,5 kN ($\gamma_f \cdot \gamma_s \cdot P_k = 1,4 \cdot 1,15 \cdot 250$). Deve-se observar que essa carga pode ser calculada a partir dos coeficientes de segurança utilizados considerando-se que o processo de ruptura se inicie com o escoamento das armaduras.

4 Conclusões

No presente trabalho, procurou-se apresentar uma abordagem manual do *Stringer and Panel Method*, sendo que foi ilustrado o procedimento de determinação dos esforços e a rotina de dimensionamento utilizando tal metodologia. De maneira a comprovar o procedimento ora aqui proposto, utilizou-se o programa ATENA2D, que por sua vez possui potencialidades para a análise não-linear.

Um dos problemas que surgem quando da utilização do *Stringer and Panel Method* refere-se à possibilidade de indeterminação estática no interior dos painéis. Nesse caso, pode-se arbitrar as tensões de cisalhamento em alguns *panels* de maneira a superar o problema. Para estruturas mais complexas, com alto grau de indeterminação estática, pode-se recorrer à resolução do sistema de equações via programas matemáticos, como por exemplo, Matlab.

Estudo complementares devem ser efetuados para estruturas com hiperstaticidade externa, uma vez que a determinação das forças no *Stringer and Panel Method* depende muito do conhecimento prévio das reações de apoio. Questões complementares como fissuração já têm sido bem tratadas, no entanto o método ainda é carente de resultados experimentais que comprovem tal abordagem. Na falta de resultados experimentais, a análise não-linear tem se apresentado como uma alternativa muito atrativa para validação.

Para o caso em questão, pode-se supor cargas de ruptura mínimas de 403 kN ($\gamma_f \cdot \gamma_s \cdot P_k$) para o modo de ruptura iniciado pelas armaduras e de 490 kN ($\gamma_f \cdot \gamma_c \cdot P_k$) para o modo de ruptura iniciado pelo concreto, uma vez que foram adotados os coeficientes $\gamma_f = 1,4$, $\gamma_s = 1,15$ e $\gamma_c = 1,4$.

Na estrutura investigada utilizando o ATENA2D, chegou-se à conclusão de que a carga de ruptura numérica deve ser superior à carga característica de 250 kN, uma vez que a partir da

carga de 269 kN não foi mais possível obter convergência do modelo, mesmo com a alteração do processo de solução e com a diminuição significativa dos passos de carga. Por outro lado, o programa SpanCAD apontou uma carga de ruína de aproximadamente 400 kN, que por sua vez se aproxima muito da carga de ruptura teórica de 403 kN. Deve-se observar que a formulação dos programas selecionados é completamente diferente, sendo a abordagem empregada pelo programa ATENA relativamente mais complexa.

O problema em questão demonstra que a análise não-linear pode trazer muitas dúvidas ao usuário, tendo-se em vista principalmente o grande número de parâmetros exigidos e as opções disponíveis para os modelos de fissuração. Além disso, as várias possibilidades para os métodos de solução nem sempre garantem a convergência, fazendo com que o usuário possa assumir erroneamente uma instabilidade numérica como sendo uma carga de ruína estrutural. Deve-se ainda observar que essa dificuldade aumenta consideravelmente em função do cisalhamento ser dominante no problema em análise.

De acordo com GÜNER (2008), para uma estrutura cujo comportamento é dominado pela flexão, existe no mercado um grande número de programas capazes de simular a performance com grande precisão. Dessa maneira a análise não-linear e o projeto de estruturas cuja flexão seja o esforço dominante são considerados problemas resolvidos. Por outro lado, para estruturas cujo comportamento é afetado pelos mecanismos de cisalhamento, o número de pacotes de software é bastante escasso e a precisão dos resultados fornecidos por esses programas disponíveis é quase sempre questionável.

Finalmente, a abordagem manual de estruturas complexas utilizando o *Stringer and Panel Method* pode ser uma alternativa muito interessante para a certificação de estruturas dimensionadas com o auxílio do Método dos Elementos Finitos, fornecendo assim estimativas para as tensões e, conseqüentemente, para as quantidades de armaduras em regiões críticas. Além disso, observa-se que o método é muito competitivo com o Método das Bielas, sendo uma excelente ferramenta para o pré-dimensionamento e para o entendimento de regiões críticas onde não se há experiência prévia.

Agradecimentos

Os autores gostariam de expressar seu profundo agradecimento ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa) e à Fundação Araucária pelos investimentos financeiros necessários ao desenvolvimento da presente pesquisa.

Referências

ARGYRIS, J. H.; KELSEY, S. "Energy Theorems and Structural Analysis", Butterworth & Co. Ltd., London, 1960.

BIONDINI, F.; BONTEMPI, F.; MALERBA, P. G.; SIMONE, A. "Stringer Panel Modelling of R.C. Elements". Proceedings of the 1st International Conference on Advances in Structural Engineerings and Mechanics (ASEM99), Seoul, Korea, pp 937-942, August 23-25, 1999.

BLAAUWENDRAAD, J. "Stringer Panel Models in Structural Concrete Applied to D-Region Design", Springer, Cham, Switzerland, 2018.

BLAAUWENDRAAD, J.; HOOGENBOOM, P. C. J. "Design Instrument Spancad for Shear Walls and D-Regions", Proceedings of the fib 2002 Congress, pp. 411-416, Osaka, Japan, 2002.

BLAAUWENDRAAD, J.; HOOGENBOOM, P. C. J. "Stringer Panel Model for Structural Concrete Design". *ACI Structural Journal*, Vol. 93 No. 3, May-June, pp. 295-305, 1996.

BONTEMPI, F; MALERBA, P. G.; SIMONE, A. **“Progetto di Strutture in C.A Con Un Modello a Pannelli e Correnti”**. Atti del congresso biennale C.T.E., Padova, pp 77-87, 5-7 Novembre, 1998.

CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford Services, Ltd., London, Comité Euro-International du Béton, Laussane, 437 pp, 1993.

CERVENKA, V.; CERVENKA, J. **“ATENA Program Documentation – Part 2-1: User’s Manual for ATENA2D”**, Prague, República Tcheca, 2003.

CERVENKA, V.; CERVENKA, J. **“ATENA Program Documentation – Part 2-2: User’s Manual for ATENA3D”**, Prague, República Tcheca, 2005.

DS411. Norm for Betonkonstruktioner, **“Code of Practice for the Structural use of Concrete”** (in Danish), Dansk Standard, Copenhagen, Denmark, 1999.

GÜNER, S.. **“Performance Assessment of Shear-Critical Reinforced Concrete Plane Frames”**. Thesis, University of Toronto, 2008.

HAUKSDÓTTIR, B. **“Analysis of a Reinforced Concrete Shear Wall”**. Master's dissertation, Technical University of Denmark, 2007.

HOOGENBOOM, P.C.J. **“Discrete Elements and Nonlinearity in Design of Structural Concrete Walls”**. Dissertation, Delf University of Technology, August, 1998.

JENSEN, B. C. **“Betonelementbyggeriers Statik”** (in Danish), Polyteknisk Forlag, Lyngby, 2010.

KAERN, J. **“The Stringer Method Applied to Discs with Holes”**. IABSE Colloquium, Copenhagen, 1979, Session II, Plasticity in Reinforced Concrete, Final Report, v. 29, pp. 87-93, 1979.

LUNDGREN, H. **“Cylindrical Shells”**, The Danish Technical Press, The Institute of Civil Engineers, Copenhagen, 1949.

MELLO, A. F. A.; SOUZA, R. A. **“Analysis and Design of Reinforced Concrete Deep Beams by a Manual Approach of Stringer-Panel Method”**. Latin American Journal of Solids and Structures, v. 13, p. 1126-1151, 2016.

NIELSEN, M. P. **“On the Strength of Reinforced Concrete Discs”**, Acta Polytechnica Scandinavica, Civil Engineering Building Construction Series, n.70, Copenhagen, 1971.

NIELSEN, M. P.; HOANG, L.C. **“Limit Analysis and Concrete Plasticity”**, CRC Press, 3rd ed., Boca Raton, FL, USA, 2011.

RABBAT, B. G.; COLLINS, M. P. **“A Variable Angle Space Truss Model for Structural Concrete Members Subjected to Complex Loading”**, Douglas McHenry International Symposium on Concrete Structures, American Concrete Institute, Publication SP-55, Detroit, pp. 547-587, 1978.

SIMONE, A. **“Progetto di Strutture in C.A. con un Modello a Pannelli e Correnti”**. Graduation thesis (Tesi di laurea), Politecnico di Milano, School of Engineering, Milano, Italy, October 1998.

SIMONE, A.; MALERBA, P. G. **“Modelli Discreti Nel Progetto Di Strutture in C.A., il Modello Stringer-and-Panel”**. Atti della giornata di studio - workshop: Tecniche di progettazione strut-and-tie di elementi strutturali in cemento armato (S&T2001), Firenze, pp 41-51, 16 Marzo, 2001.

SIMONE, A.; MALERBA, P. G.; BONTEMPI, F. **“Modellazione di Zone Diffusive in Elementi in C.A. Mediante il Modello a Pannelli e Correnti”**. Atti delle Giornate AICAP '99, Torino, pp 359-368, 4-6 Novembre, 1999.