

A Utilização do Perfil de Alma Senoidal em Galpão

Carla Cristina Resende
Engenheira de Produção Civil
Universidade FUMEC
Faculdade de Engenharia e Arquitetura
Mestranda em Construção Civil
resendeccris@yahoo.com.br

Este artigo tem o objetivo de apresentar um novo perfil em aço, abordando sua origem, suas propriedades físicas, seu comportamento estrutural, vantagens e desvantagens, campo de aplicação e processo de fabricação, focando as possibilidades de um novo método construtivo racionalizado e inovador para a construção em aço.

Palavras chave: Perfil de Alma Corrugada, Galpão, Estrutura de Aço.

1. Introdução

Com o avanço das pesquisas relacionadas ao comportamento estrutural e da tecnologia de fabricação, utilização, projeto e economia, desenvolveu-se um perfil de seção I de alma corrugada com forma trapezoidal (**figura 1**) ou senoidal (**figura 2**), nas quais as mesas são normalmente constituídas por chapas planas. A forma corrugada da alma aumenta a resistência à flambagem da mesma, de forma a permitir que se atinja sua resistência plástica. Assim, podemos empregar nestas almas, chapas finas com espessura mínima de 2 mm. Este perfil permite de maneira simultânea o aumento da capacidade de carga e redução de peso da estrutura.



Figura 1 – Perfil de Alma Trapezoidal
Fonte: de Hoop (2003)



Figura 2 – Perfil de Alma Senoidal
Fonte: Zeman (1999)

A engenharia, na busca de novas tecnologias de construção, tem utilizado os perfis de alma corrugada em estruturas de cobertura, pilares, vigas de rolamento, vigas de pisos, pontes e passarelas. Este perfil tem maior eficiência quando aplicado a elementos estruturais onde a solicitação ao momento fletor é predominante em relação à solicitação à força normal.

As pesquisas realizadas com o perfil de alma corrugada têm como objetivo elaborar critérios para dimensionamento, avaliar o seu comportamento mecânico submetido a cargas variáveis, verificar sua utilização em estruturas mistas, estudar o comportamento das ligações, desenvolver novas tecnologias de fabricação, dentre outros. Muitos estudos baseiam-se em resultados experimentais e em resultados obtidos pelo método dos elementos finitos.

O processo de fabricação das peças de alma corrugada é feito por modernos equipamentos automatizados, o que torna esta tecnologia uma inovação na construção em aço.

2. Histórico

Segundo de Hoop (2003), em 1966 uma empresa Sueca especialista em construção de pontes, desenvolveu a idéia de produzir perfis de alma corrugada. Somente em 1986, a *Campeon Bernard Corporation* construiu a *Cognac Bridge*, primeira ponte

localizada na França, com a aplicação desse perfil (**figura 3**).



Figura 3: Cognac Bridge (França)
Fonte: Wang (2003)

Em seguida foram construídas diversas pontes e viadutos como o *Maupré Viaduct*, na França, a *Hondani Bridge*, no Japão e posteriormente diversas outras.

Atualmente, esta tecnologia vem sendo aprimorada por várias empresas como a *GLP Corrugated Plate Industry* na Alemanha, a *Zeman & Co* na Áustria, a *Ranabalken* na Suécia e a *Codeme Engenharia* no Brasil.



Figura 4 – Instalações do exército dos EUA (Alemanha)
Fonte: de Hoop (2003)



Figura 5 – Galpão Pavuna da Cebel Empreendimentos (Brasil) - Fonte: Acervo Codeme Engenharia

As peças de alma corrugada têm sido usadas em diversos sistemas es-

truturais em todo o mundo, proporcionando redução de peso da estrutura, baixo custo de fabricação e rapidez de montagem.

3. Parâmetros do Perfil de Alma Senoidal

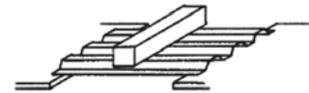
3.1. Dimensões

As características apresentadas abaixo, referem-se ao Perfil de Alma Senoidal em estudo no Brasil.

4. Resistência Horizontais e Verticais das Chapas Corrugadas Senoidais



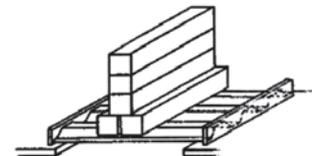
Uma chapa fina de aço apresentará grandes deslocamentos verticais ao apoiar suas extremidades. Esta peça pode entrar em colapso sob a ação do seu peso próprio.



Se a mesma chapa fina de aço for corrugada na direção perpendicular aos apoios, esta suportará várias vezes seu peso próprio.



Ultrapassando a carga, o limite de resistência da chapa provocará o colapso provocando o aplainamento das corrugações.



Utilizando enrijecedores transversais nas extremidades apoiadas, a capacidade da chapa aumentará sensivelmente suportando mais cargas.

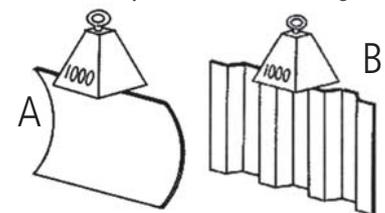
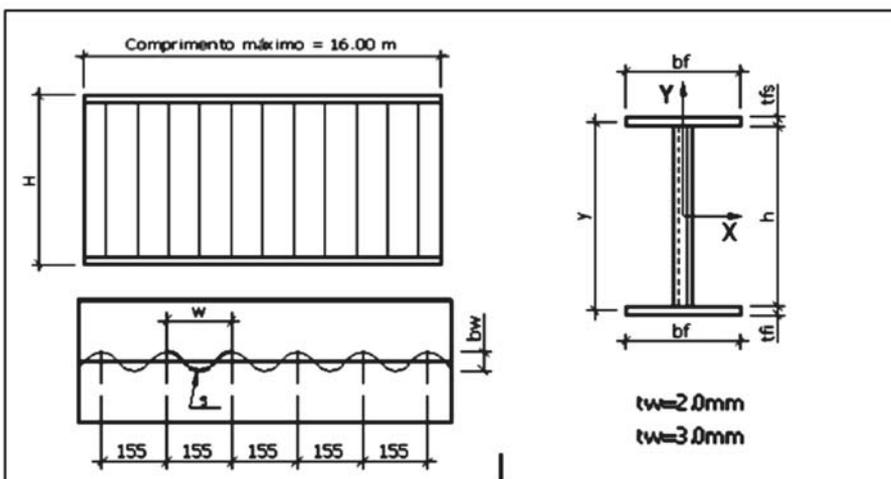


Figura 7: Esquema ilustrado da resistência horizontal e vertical de uma chapa corrugada. Fonte: Adaptado do site da GLP (2005)



Altura da alma - h (mm)	400, 500, 600, 800, 1000 e 1200	
Espessura da alma - tw (mm)	2,0 e 3,0	
Espessura das mesas (mm)	$4,75 \leq t_{fs} \leq 19,0$ e $4,75 \leq t_{fi} \leq 19,0$	
Largura das mesas (mm)	$125 \leq b_f \leq 350$	
Denominação	PSS h x bf x tfs/tfi x tw	
Materiais	Aço das mesas	USI CIVIL 350: $f_y = 3500 \text{ kg/cm}^2$ e $f_u = 5000 \text{ kg/cm}^2$
	Aço da alma	USI CIVIL 300: $f_y = 3000 \text{ kg/cm}^2$ e $f_u = 4100 \text{ kg/cm}^2$

Figura 6 – Dimensões e características do perfil de alma senoidal. Fonte: Manual técnico da Zeman & Co (1997) e manual técnico da Codeme Eng. SA (2005)

3.2. Geometria

Áreas:

$A_f = A_{f1} + A_{f2}$ (Área das mesas);
 $A_{f1} = t_{f1} b_{f1}$ (Área da mesa superior);
 $A_{f2} = t_{f2} b_{f2}$ (Área da mesa inferior);
 $A_w = t_w h$ (Área da alma);
 $A_v = A_w \frac{w}{s}$ (Área de cisalhamento);
 $Peso = 0,785 \left(A_f + \frac{s}{w} A_w \right)$ (Peso do perfil);

Os valores de Af e Aw devem ser dados em cm². O peso resultante é dado em kg/m;

Inércia:

$I_x = \frac{A_{f1} A_{f2}}{A_f + A_{f1} + A_{f2}} y^2$ (Inércia em relação ao eixo X);
 $I_{yf1} = \frac{b_{f1}^3 t_{f1}}{12}$ (Inércia da mesa superior em relação ao eixo Y);
 $I_{yf2} = \frac{b_{f2}^3 t_{f2}}{12}$ (Inércia da mesa inferior em relação ao eixo Y);

Raio de giração:

$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A_f}}$ (Raio de giração em relação ao eixo X);
 $r_{yf1} = \sqrt{\frac{I_{yf1}}{A_{f1}}}$ (Raio de giração da mesa superior em relação ao eixo Y);
 $r_{yf2} = \sqrt{\frac{I_{yf2}}{A_{f2}}}$ (Raio de giração da mesa inferior em relação ao eixo Y);

B- Se a mesma chapa fina de aço for corrugada, haverá um significativo aumento de rigidez à flexão na direção perpendicular ao seu plano, aumentando a sua capacidade de resistir à força de compressão.

Segundo *Hamada et al. (1984)*, a placa corrugada possui resistência às forças que atuam perpendicularmente na horizontal e vertical em relação a chapa plana.

Em decorrência da corrugação, a chapa passa ter pouca resistência quando submetida à força normal na direção perpendicular às nervuras (**figura 8**), ou seja a alma não é capaz de transmitir tensões normais longitudinais significativas. Isto significa, em termos estáticos, que o comportamento de Perfis de Alma Senoidal corresponde ao de treliças, onde o momento fletor e a força normal são resistidos pelas mesas e a força cortante pela alma. As mesas aumentam a rigidez lateral minimizando a possibilidade de flambagem lateral por torção.



Figura 8: Resistência longitudinal da chapa corrugada - Fonte: de Hoop (2003).

4.1. Determinação dos Esforços Axiais nas Mesas e na Alma

Tendo como base o comportamento de uma treliça, a resistência de um Perfil de Alma Senoidal é obtida com a determinação da resistência das mesas e da alma. A analogia entre o comportamento de uma treliça e o comportamento de um Perfil de Alma Senoidal pode ser obtido no esquema abaixo: Vd (Força de cisalhamento na alma)

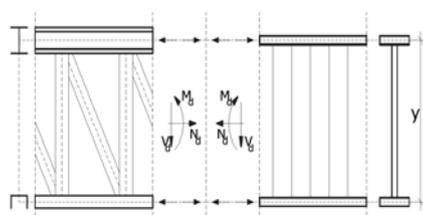


Figura 9: Esquema do comportamento de uma treliça e de um Perfil de Alma Senoidal
Fonte: Manual técnico da Codeme Eng. SA (2005).

Mesas:

$$N_{df} = N_d \frac{A_f}{A_f} \pm \frac{M_d}{y} \quad (\text{Força axial na mesa superior})$$

$$N_{df} = N_d \frac{A_f}{A_f} \pm \frac{M_d}{y} \quad (\text{Força axial na mesa inferior})$$

5. Vantagens e Desvantagens dos Perfis de Alma Senoidal

Os Perfis de Alma Senoidal apresentam grande resistência à flambagem local da alma, facilitando o alcance do limite plástico. Este fato permite a eliminação de enrijecedores transversais que encarecem a estrutura e que possivelmente seriam usados em perfis de alma plana devido à necessidade do aumento da altura das seções. À medida que se aumenta a altura das seções do perfil de alma plana (perfil laminado), ocorre grande variação de peso entre as várias dimensões disponíveis gerando resultados anti-econômicos. No Perfil de Alma Senoidal, esta relação é o contrário. A relação entre resistência e peso próprio, permitem que maiores vãos sejam vencidos, reduzindo a quantidade de pilares da obra e, conseqüentemente, de elementos de fundação, proporcionando redução do peso da estrutura, maior velocidade e menor custo de montagem.

Masami Hamada (1984), apresentou uma pesquisa onde os perfis de alma corrugada pesam entre 9% e 13% menos que os perfis de alma plana.

Segundo de Hoop (2003), além de vários benefícios somados à tecnologia e a otimização de produção, a utilização de corrugação senoidal apresenta ainda a vantagem de eliminar a flambagem local dos painéis planos existentes na alma trapezoidal, ou seja, por não haver partes planas no Perfil de Alma Senoidal, a susceptibilidade à flambagem local da alma será menor.

Outra vantagem deste perfil é o baixo custo de fabricação comparado ao da treliça. Em percentuais, a mão-de-obra de fabricação do Perfil de Alma Senoidal é 20% menor em relação à tre-

liça. Entre as desvantagens deste perfil está o desenvolvimento tardio de programas para o dimensionamento estrutural, a não existência de norma brasileira para projeto, uso reduzido em função do desconhecimento da maioria dos projetistas, falta de estudo relacionado ao projeto e à execução de ligações.

Outra desvantagem deste perfil refere-se ao comportamento em situações de incêndio, onde a alma pode aquecer mais rápido em função de sua baixa espessura. Por outro lado, a alma não participa da resistência ao momento fletor.

6. Processo de Fabricação

O processo de fabricação do Perfil de Alma Senoidal é todo automatizado, utilizando modernas tecnologias da robótica, revolucionando a construção em aço.

A fabricação do perfil passa por diversas etapas que serão descritas a seguir:

A chapa que será usada na alma é alimentada através do desbobinador hidráulico (**figura 10**) e em seguida transportada pelos aplainadores (**figura 11**) que garantem a centralização da mesma na linha de produção. Este processo garante o ajuste perfeito às exigências especificadas em projeto, permitindo que o corte (**figura 12**) da chapa seja feito de tal forma a possibilitar a produção de várias alturas a partir de uma mesma bobina.

Em seguida, a chapa é encaminhada à estação de conformação para



Figura 10 – Desbobinador
Fonte: Site da Zeman & Co (1997) e Manual Técnico da Codeme Eng. SA (2005)



Figura 11 – Aplainadores



Figura 12 – Estação de corte

obter a forma senoidal (figura 13). As chapas das mesas são preparadas e juntamente com a chapa da alma já corrugada são transportados à estação de montagem (figura 14). As mesas são pressionadas contra as laterais da alma corrugada através das garras hidráulicas para o início da soldagem (figura 15).

Segundo Pimenta (2005), citado em Plais (2005), as soldas são executadas automaticamente por dois robôs, um em cada mesa do perfil. A soldagem dos perfis de alma plana é diferente da soldagem dos Perfis de Alma Senoidal, onde a velocidade de translação, o ângulo de soldagem e a velocidade de avanço do arame não são constantes ao longo do comprimento da peça, sendo necessário variar estes parâmetros à medida que os robôs percorrem seu caminho. Ressalta-se um complicador adicional que é a posição de execução que ora é ascendente, ora descendente e outras vezes praticamente plana. Para que se possa então garantir a execução de soldas com a qualidade exigida, o sistema utiliza o processo de soldagem MAG de alto desempenho. O processo de soldagem MAG é um processo semi ou totalmente automático no qual um arco elétrico é aberto entre o eletrodo e a peça

protegida por uma cortina de gases. O sistema possui as seguintes vantagens, dentre outras:

- assegura alta penetração, com constante verificação (“on-line”) do perfil da solda;
- minimiza distorções provocadas pelo processo de soldagem;
- permite todas as posições e um menor ângulo de soldagem.

A determinação da linha de soldagem entre a alma e as mesas são obtidas através da medição a laser e do registro do percurso a ser seguido pelos robôs. Para tanto, eles se movimentam de uma extremidade a outra, em ambos os lados do perfil. Com os percursos registrados, os robôs praticamente executam a soldagem de ambos os lados simultaneamente a uma velocidade de um metro por minuto.

Ao término do processo de soldagem os robôs retornam as suas posições originais para realização da auto-



Figura 13 – Estação de conformação



Figura 14 – Estação de montagem



Figura 15 – Estação de soldagem

verificação e limpeza dos bicos de soldagem. Em seguida as garras hidráulicas liberam o perfil soldado (figura 17) transportando-o à estação de liberação (figura 16).



Figura 16 – Estação de liberação



Figura 17 – Perfis de Alma Senoidal
Fonte: Manual técnico da Codeme Eng. SA (2005).

7. Estudo Comparativo entre Perfis

Foi utilizado o programa Robot ©, para estudar três sistemas de coberturas com tesouras bi-apoiadas, terças contínuas, mesmo parâmetro para cálculo (figura 18) e norma americana (American Institute of Steel Construction – AISC).

Dados	Perfil de Alma Senoidal	Perfil de Alma Plana	Perfil de Alma Treliçada
Vão da tesoura (m)	20,0	20,0	20,0
Espaçamento das tesouras (m)	10,0	10,0	10,0
Espaçamento das terças (m)	2,5	2,5	2,5
Carga permanente (kg/m ²)	10,0	10,0	10,0
Sobrecarga (kg/m ²)	25,0	25,0	25,0

Figura 18 – Dados comuns para análise. - Fonte: O autor

Para alcançar todas as resistências de cálculo conforme exigência da norma americana, foram adotados os seguintes perfis com as respectivas dimensões:

Dados	Perfil de Alma Senoidal	Perfil de Alma Plana	Perfil de Alma Treliçada
Altura da alma (mm)	800,0	700,0	Cálculo
Largura da mesa (mm)	150,0	150,0	Cálculo
Espessura da mesa (mm)	9,5	6,30	Cálculo
Espessura da alma (mm)	2,0	6,3	Cálculo

Figura 19 – Dimensões dos perfis. - Fonte: Programa Robot ©

Os pesos encontrados foram os seguintes:

Dados	Perfil de Alma Senoidal	Perfil de Alma Plana	Perfil de Alma Treliçada
Peso calculado (kg/m)	36,73	48,83	41,68
Percentuais em relação ao Senoidal	0	25%	12%

Figura 20 – Peso dos sistemas. - Fonte: Programa Robot ©

Pode-se concluir que o sistema com o Perfil de Alma senoidal é 25% mais leve que o sistema de perfil de alma plana e 12% que o sistema de perfil de alma treliçada. Levando em consideração que o custo de mão-de-obra do Perfil de Alma Senoidal é 20% menor que o treliçado e que a sua fabricação é quatro vezes mais rápida que uma treliça, em função de ser um sistema automatizado, conclui-se que

este perfil se torna interessante para o desenvolvimento de novas pesquisas e aplicação na construção civil.

8. Conclusão

Pode-se concluir que a Engenharia vêm buscando ao longo dos anos, soluções mais econômicas e competitivas para o mercado da construção, objetivando a harmonia dos sistemas construtivos e a redução constante de custos.

Apostando na industrialização da construção, uma tendência mundial intensifica os estudos realizados com o Perfil de Alma Senoidal, a fim de obter uma tecnologia revolucionária para a construção em aço. O perfil está sendo desenvolvido em modernos equipamentos automatizados, utilizando a mais recente tecnologia de soldagem.

Apesar de algumas desvantagens apresentadas, o Perfil de Alma Senoidal dispõe de características decisivas para o crescimento da estrutura metálica no País. A redução de peso encontrada anteriormente comprova que este sistema é econômico, inovador e apto a ser usado em diversos sistemas construtivos.

Estudos continuam sendo realizados, na busca de métodos menos conservadores, eficientes e com alto nível de qualidade e segurança para a construção em aço. ■

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Institute of Steel Construction (1999) – “Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings” - Chicago, Illinois.
- American Society of Civil Engineers (2002) – SEI/ASCE 7-02 – “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures” – Reston, Virginia.
- Bastos, Lília da Rocha, Manual para a elaboração de projetos e Relatórios de pesquisa, teses, dissertações e monografia (4ª edição). Rio de Janeiro: LTC, 1995.
- Chizzotti, Antonio. Pesquisa em Ciências Humanas e Sociais. São Paulo: Cortez Editora, 1991.
- de Hoop, H. G. (2003) – “Literature Study – Master Thesis: Girders with Corrugated Webs” – Papendrecht, The Netherlands.
- de Hoop, H. G. (2003) – “Explorative Analysis – Master Thesis: Girders with Corrugated Webs” – Papendrecht, The Netherlands.
- Elgaaly, M., Seshadri, A. & Hamilton, R. W. (1997) – “Bending Strength of Steel Beams with Corrugated Webs” – Journal of Structural Engineering.
- Elgaaly, M. & Seshadri, A. (1997) – “Girders with Corrugated Webs Under Partial Compressive Edge Loading” – Journal of Structural Engineering.
- European Standard Eurocode 3: Design of steel structures Part 1.5: Plated structural elements
- European Committee for Standardisation, Brussel, february 2003.
- FRANÇA, Júnia Lessa et al. Manual para normalização de publicações técnico-científicas. 6. ed.rev. amp. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2003. 230p.
- GLP, Corrugated Plate Industry, disponível em <http://www.cpi-glp.com/>, acesso em 15/07/2005.
- Hop, M.J. Staal-beton uitbouwbruggen met geprofileerde lijven – Literature study TU Delft/ Hollandse Staalbouw Maatschappij, Gouda, September 1997.
- Plais, Wagner Júnior (2005) - CODEME Engenharia S.A.- Perfis de Alma Senoidal (Versão 1.0 de 20/07/2005)
- Sayed-Ahamed, E. Y. (2005) – “Plate Girders with Corrugated Steel Webs” – Engineering Journal / First Quarter / 2005, pp. 1-13.
- Sayed-Ahamed, E. Y. (2005) – “Lateral torsion-flexure buckling of corrugated web steel girders” – Proceedings of the Institution of Civil Engineers / Structure & Buildings 158, pp. 53-69.
- Siokola, W. (1999) – “Corrugated Web Beam: Technical Documentation” – 4th Edition - Zeman & Co.
- Verschoor, J. Specialists in moving structures, Brochure Department Marketing & Sales of Iv-Groep b.v., Papendrecht, 2003.
- ZEMAN & Co, Corrugated Web Beam, disponível em <http://www.zeman-stahl.com>, acesso em 20/06/2005.
- Wang, X. (2003) – “Behavior of Steel Members with Trapezoidally Corrugated Webs and Tubular Flanges under Static Loading” – A Thesis of Doctor of Philosophy – Drexel University, USA.
- Wierda, S. Ontwerphandleiding – Plaatligger met geprofileerd lijf Iv-Consult b.v., Papendrecht, Oktober 2002.
- Winter, P.E. de Huys – Plaatligger met geprofileerd lijf, inventarisatie van te stellen eisen
- TNO Bouw, Delft, November 1997.