

Capítulo 9

Estruturas-sanduíche

As placas chamadas sanduíche constituem um tipo especial de laminado, composto por três itens principais: duas camadas externas, finas, chamadas **faces** e uma camada interna, espessa, chamada **núcleo**. A função das faces é a de suportar tensões normais de tração, compressão ou cisalhamento coplanar, associadas à flexão da placa, como ilustrado na Figura 9.1. Uma das funções do núcleo é manter o afastamento das faces, garantindo um alto momento de inércia, de forma análoga à alma de uma viga de perfil I. O núcleo deve ter uma rigidez na direção perpendicular às faces tal que o esmagamento seja evitado. Também sua rigidez ao cisalhamento transversal deve ser grande o suficiente para garantir que o conjunto funcione como uma unidade. Uma vez que as tensões normais na região central de uma placa flexionada são bastante pequenas, o núcleo pode ser constituído por uma série de materiais e formas construtivas bastante leves. As principais **formas construtivas** dos núcleos são, por exemplo:

- colmeias;
- espumas formadas por plásticos expandidos;
- corrugados;
- madeira;
- plásticos.

Os corrugados mais conhecidos são aqueles vistos no núcleo de papelão comum usado em embalagens, onde duas folhas de papel servem de face e uma folha corrugada é usada como núcleo. Outros tipos comuns de sanduíches são as portas e divisórias de escritórios e móveis. Os materiais usados em corrugados e colmeias vão de papel e papelão até algodão, tecidos têxteis impregnados e lâminas de alumínio ou aço. As colmeias estruturais, também conhecidas na literatura por *honeycomb*, (Figura 9.13), serão tratadas ao longo do presente capítulo.

9.1 Aplicação de estruturas-sanduíche

Comentamos a seguir algumas das áreas da indústria onde as estruturas-sanduíche têm sido usadas com sucesso a partir da década de 1950.

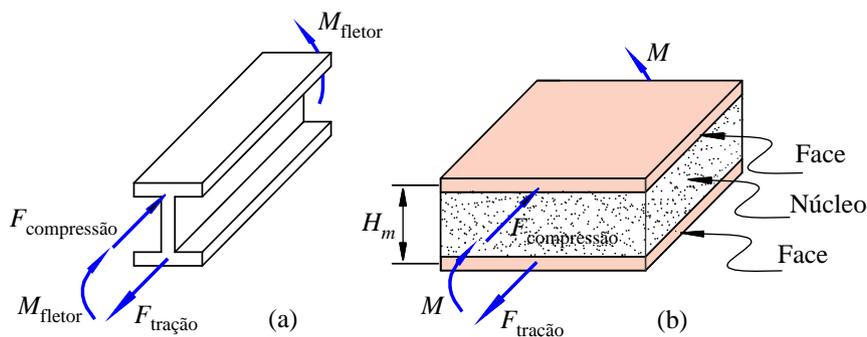


Figura 9.1: Analogia entre viga I em (a), e placa sanduíche em (b).

- **Aviões**

- pás de rotor de helicóptero;
- bico da aeronave;
- painéis das asas;
- dutos de ar;
- piso de compartimento de carga;
- porta e estrutura de portal.

- **Mísseis e veículos espaciais**

- aletas e superfícies de controle;
- antenas;
- tanques;
- contêineres de carga.

- **Construção civil**

- abrigos pré-fabricados para defesa civil;
- divisórias em escritórios;
- portas.

- **Outros**

- móveis domésticos e de escritório;
- cascos de barcos;
- piso de *trailers* e *moto-homes*;
- *contêineres* e carrocerias.

Observe que, da mesma forma como no caso dos compostos em geral, a aplicação dos sanduíches tem se difundido a partir da década de 1990 e se expandido em direção à indústria civil e, em certos casos, abandonado as aplicações iniciais nas indústrias aeroespacial e militar.

9.1.1 Aspectos gerais dos sanduíches

1 – Rigidez

Uma das principais características dos sanduíches é a de aliarem alta rigidez a baixíssimos pesos. O exemplo seguinte é uma demonstração clássica de como a rigidez e a massa de um sanduíche podem ser manipulados.

Exemplo 1 – Cálculo comparativo de rigidez de sanduíches

Considere um vão de $l = 1.000$ mm a ser vencido por uma viga biapoiada sob carga distribuída uniforme $q_0 = 10^{-5}$ N/mm² (aproximadamente 10^{-4} kgf/cm²). Considere três projetos distintos, como visto na Figura 9.2:

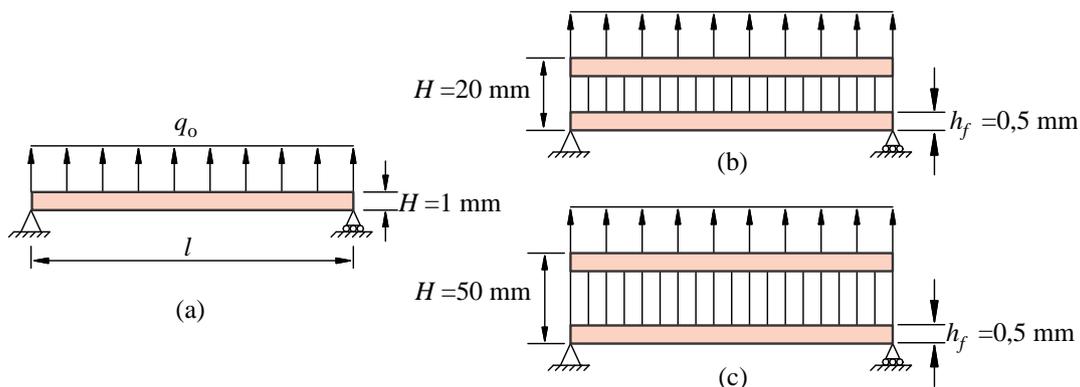


Figura 9.2: Viga maça e sanduíches.

- Uma placa de alumínio de espessura $H = 1,0$ mm;
- Um sanduíche com faces de espessura $h_f = 0,5$ mm de alumínio e um núcleo de colmeia de espessura $H_n = 19,0$ mm, o que resulta numa espessura total do sanduíche de $H = H_n + 2h_f = 20$ mm;

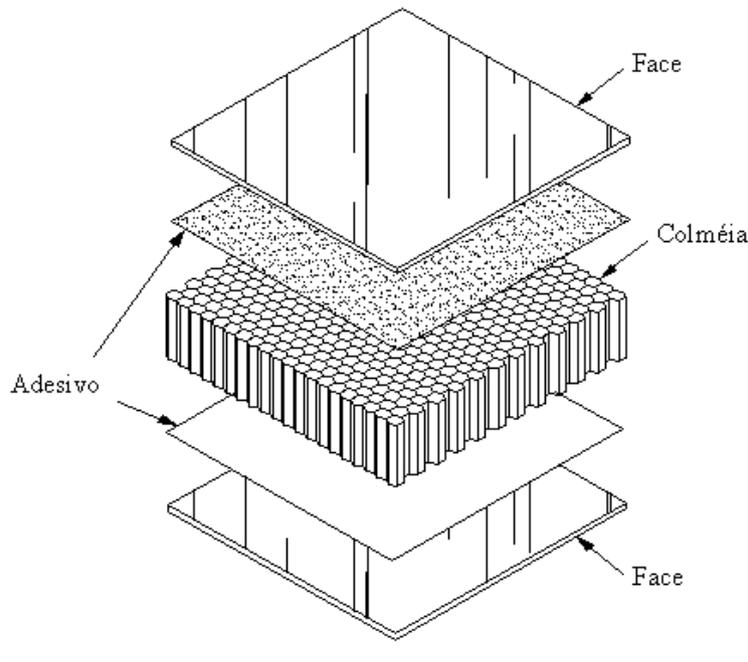


Figura 9.3: Vista explodida de um painel-sanduíche de colméia.

Observe que o custo da montagem é bastante afetado pela escolha do tipo de adesivo. Adesivos que curam a temperatura ambiente e baixa pressão podem ser usados em instalações bastante simples. Por sua vez, adesivos que requerem temperaturas e pressões elevadas exigem equipamentos geralmente caros. A aplicação de pressão e temperatura é conseguida por prensas, autoclave com placas aquecidas ou atmosfera aquecida. Os **autoclaves** são equipados com transdutores e controles de temperatura e pressão. O tamanho e a forma da peça são limitados pelas dimensões dos equipamentos. Uma forma usada para contornar essa limitação consiste em subdividir a peça em partes menores.

As Tabelas 9.2 e 9.3 mostram alguns dados sobre adesivos estruturais comerciais, como faixa de temperatura de trabalho, resistência ao cisalhamento, alguns nomes de fabricantes e o tipo de materiais que podem ser unidos por cada tipo de adesivo [21]. Os valores de temperatura e resistência listados devem ser vistos apenas como indicação geral. As resistências são obtidas após uma exposição de 192 horas à temperatura indicada. De qualquer forma, os valores obtidos experimentalmente dependem de diversos fatores como dimensões do corpo de provas, umidade ambiente, meio químico, radiação e qualidade do serviço de colagem, entre outros fatores.

Observe que alguns tipos de colmeia são formados por chapas tão finas quanto $18\ \mu\text{m}$ ($0,0007\ \text{pol}$). A possível área de contato com a superfície da face é portanto diminuta e insuficiente. A viscosidade do adesivo e a pressão imposta devem ser tais que se consiga algo da forma ilustrada na Figura 9.4a. Ali, a área de contato estende-se pela superfície lateral da parede da colmeia. Caso a pressão nas faces seja insuficiente, ou o adesivo demasiado viscoso, pode ocorrer o ilustrado na Figura 9.4b, uma insuficiência de área aderida. Pode também ocorrer um adesivo com viscosidade e molhabilidade insuficiente, de forma que ele pode escorrer pela parede da colmeia como na Figura 9.4c.

Outro tipo de problema pode ocorrer na colagem de duas superfícies planas ou de encaixe. Por causa das diferenças dimensionais ou da forma de compressão aplicada, o adesivo pode se distribuir de maneira não uniforme, sendo às vezes completamente expulso de certas regiões. Uma solução comum consiste em usar um tecido ou tela de fibras, pré-embebido, entre duas camadas de adesivo. O tecido então dificulta o escoamento do adesivo de uma região a outra.

Tabela 9.2: Alguns adesivos estruturais comerciais. A resistência indicada é ao cisalhamento, em MPa. Temperaturas em °C.

	Tipo de adesivo	Temp. trab. T	Resist. à temp. T	Resist. à temp. ambiente	Fabricantes e designações comerciais
A	Filmes nitrilo-fenólicos				3M C. - AF30, AF31, AF32, AF6, AF10 Narmco - Meltbond 402 BF Goodrich - Plastilock 601, 603, 637
B	Epóxi não-modificado	-55 150	9-21 5,5-21	21	Narmco 3M Co.
C	Filme epóxi modificado para cura a 120 °C	-120 80	10-17 7-13	31	3M Co. - AF126, AF126-2, AF127 Narmco - Meltbond 117, M1113, M1133 BF Goodrich-Plastlock 706, 707, 717 Ciba-Geigy - R393, R7114 Hexol Corp. - HP348, F185
D	Filme epóxi modificado para cura a 175 °C	-55 120	21-23 10-17	23	3M Co. - AF130-2, AF131-A, AF193-2 Narmco - Meltbond 328, 329, 329-1, 1515 BF Goodrich-Plastlock 729-3, 731, 737 Hexcel - Structufilm R398
E	Epóxi poliamida	-185 120	28-34 19-23	38	Hysol - EA951 3M Co. - AF42 American Cyanamid - FM1000
F	Filme de poliamida	até 310	23	23	Hexel Corp. - HP955, HP956 American Cyanamid - FM34B-18

“Temp.”, “trab.” e “resist.” indicam temperatura, trabalho e resistência, respectivamente.

Tabela 9.3: Combinações recomendadas de adesivo e aderentes. (CP = compatível, P = parcialmente compatível, mas com possível liberação de gases.) As letras A, B, ..., F são os adesivos ilustrados na tabela indicada.

Partes aderentes [21]	Adesivos compatíveis (da Tabela 9.2)					
	A	B	C	D	E	F
Chapas:						
Alumínio	CP	CP	CP	CP	CP	
Aço	CP	CP	CP	CP	CP	
Titânio	CP	CP	CP	CP	CP	CP
Magnésio	CP	CP	CP	CP	CP	CP
Colméia:						
Alumínio	P	CP	CP	P	CP	
Aço inox	P	CP	CP	P	CP	CP
Colméia:						
Papel impregnado	P	CP		P		
Fibra de vidro	P	CP	CP	P	P	
Espumas:						
Poliuretano	P	CP		P		
Poliestireno	P	CP	CP	CP	CP	
Laminado vidro/epóxi	CP	CP	CP	CP	CP	

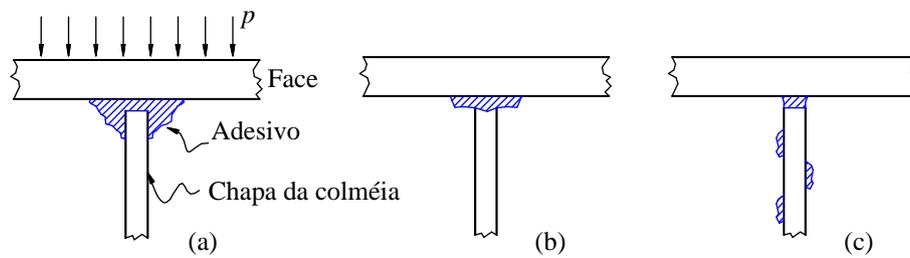


Figura 9.4: Detalhe da região adesivo-face-colméia, sob pressão p nas faces. Efeitos da pressão aplicada e da viscosidade do adesivo [21].

9.3 Modos de falha

A Figura 9.5 ilustra diversos modos de falha possíveis em sanduíche, alguns mais característicos de núcleos de colmeia, e outros que podem ocorrer em núcleos de corrugados ou homogêneos. Consideramos a seguir alguns aspectos destes modos de falha, conforme os itens a) – g) da Figura 9.5 [21].

a) Escoamento ou ruptura das faces

O esforço de flexão é suportado no painel diretamente pelas tensões de tração e compressão nas faces. Carregamentos coplanares também podem induzir tensões normais e cisalhantes nas faces, de forma que estas devem ser capazes de suportá-las em segurança.

b) Cisalhamento no núcleo

As cargas transversais induzem esforços cortantes. As tensões cisalhantes que resultam se distribuem principalmente pelo núcleo, de forma que este deve ser capaz de suportá-las. Da mesma forma o adesivo suporta principalmente cisalhamento, como ilustrado na Figura 9.5b à direita. O modo de falha ilustrado na figura à esquerda pode ocorrer por uma conjugação de alto esforço cortante provocado por grandes cargas próximas aos apoios, com resistência ao cisalhamento do núcleo insuficiente e espessura de painel muito pequena.

c) Flambagem global do painel

O núcleo deve ter espessura e módulo de elasticidade cisalhante grandes o suficiente para prevenir a flambagem global do painel quando sob cargas compressivas, como ilustrado na Figura 9.5c à esquerda. Na figura à direita, nota-se uma instabilidade também global, porém mais localizada.

d) Deflexão excessiva

A estrutura do painel deve ter rigidez flexural suficiente para evitar deflexões excessivas sob as cargas de projeto.

e) Enrugamento das faces (*wrinkling*)

Este é um modo de falha bastante característico dos sanduíches. A falha por enrugamento é uma flambagem local das faces. Essa flambagem pode ser entendida, e é analisada, como um problema de flambagem de placa sobre uma fundação elástica, no caso o núcleo. No Capítulo 17 apresentaremos detalhes desta análise.

Note que, tendo ocorrido a flambagem, a face pode se defletir localmente para dentro ou para fora. As consequências, então, podem ser aquelas ilustradas nas Figuras 9.5e, isto é, pode ocorrer falha do adesivo ou compressão do núcleo.

f) Flambagem intracelular (*dimpling*)

Este modo de falha é característico dos sanduíches de colmeia. Aqui a flambagem ocorre apenas na região da face circunscrita por uma célula de colmeia. Esta falha é mais provável quanto mais fina a face e maior o diâmetro da célula.

Observe que, apesar de esta ser uma falha local, ela representa instantaneamente uma redução global na rigidez do painel. Também, o processo local de falha pode se propagar numa reação em cadeia até uma falha global catastrófica. Isto pode ocorrer sob carga estática ou sob carga dinâmica e pode desenvolver um processo degenerativo gradual de fadiga. As mesmas observações são também aplicáveis a todos os outros modos locais de falha locais ilustrados, como o *wrinkling*.

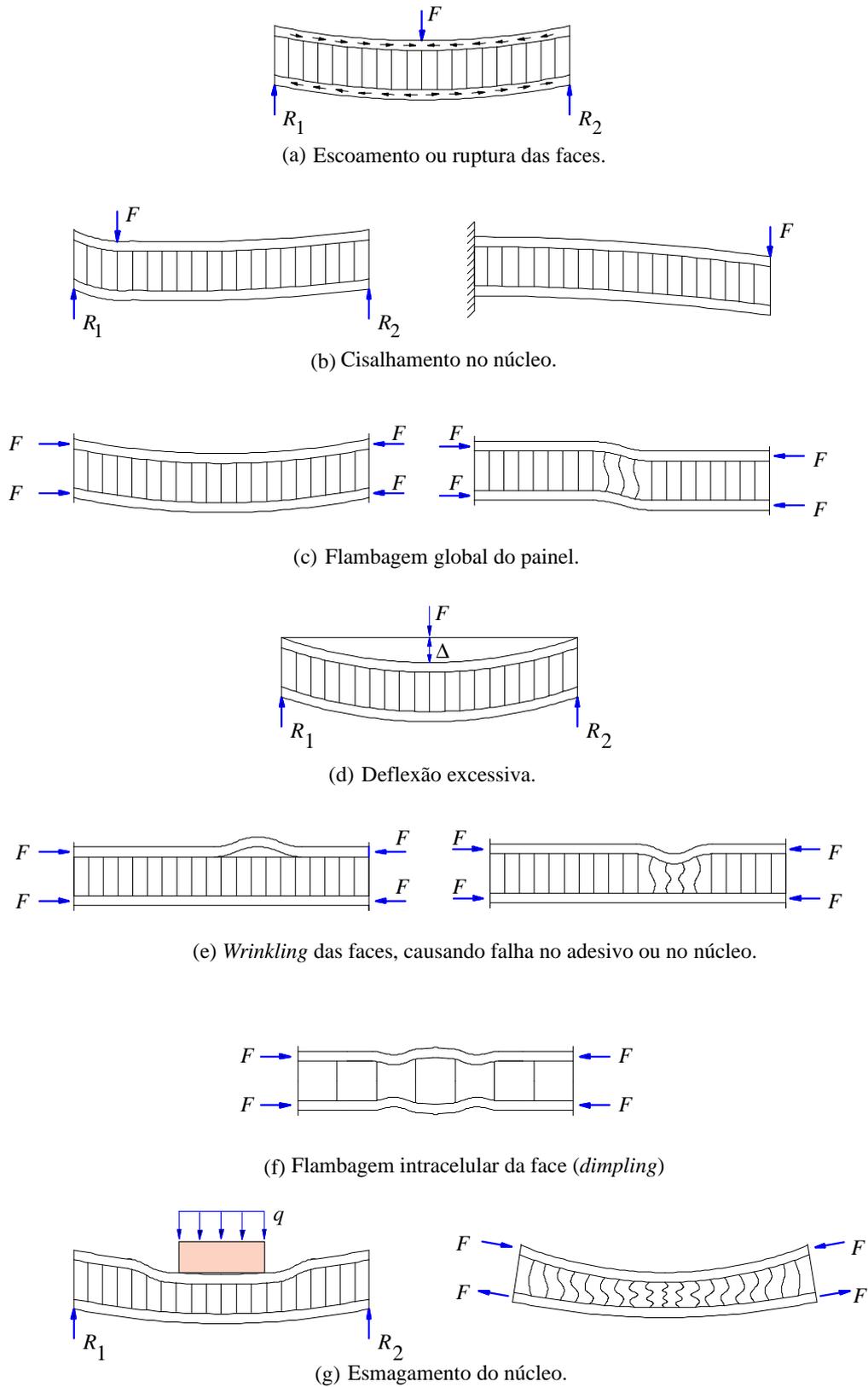


Figura 9.5: Ilustrações de diversos modos de falha dos sanduíches de colméia [21].

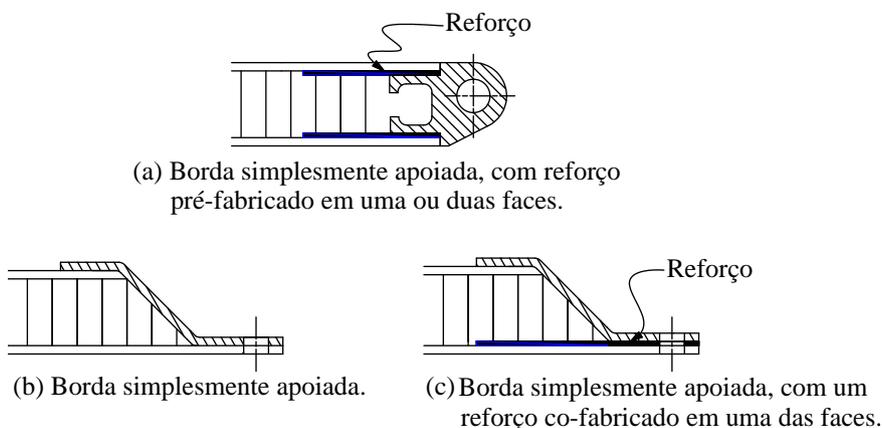


Figura 9.8: Apoios que aproximam bordas simplesmente apoiadas. [21].

Desta forma, a maioria dos dispositivos de fechamento co-fabricados são internos às faces, como ilustrado na Figura 9.7. Mesmo não requerendo ferramentas especiais por não terem protuberâncias nas faces, os dispositivos co-fabricados são ainda mais caros que os pós-fabricados, porque frequentemente requerem uma operação extra, o frezamento no núcleo, para permitir o encaixe do dispositivo de fechamento. Isto pode ser visto, por exemplo, nas Figuras 9.7. Isto significa que, aparentemente, estes dispositivos não apresentam vantagens. Mas existe uma situação em que eles não representam acréscimo de trabalho e custo. É o caso de painéis curvos, ou trapezoidais em que geralmente não se usa a prensa aquecida, mas uma cura em autoclave ou em membrana sob vácuo aquecida em forno. Neste caso precisa-se de uma ferramenta especial para dar a curvatura necessária ao painel, de forma que as alterações necessárias para permitir a colocação de um dispositivo de fechamento co-fabricado possam ser feitas com pouco trabalho extra. Pode-se então usar os fechamentos externos da Figura 9.6.

Observe que os fechamentos externos representam irregularidades geométricas na superfície do painel. Em algumas situações isto pode ser altamente indesejável, como no caso do painel em região de escoamento de gás ou líquido. Nestes casos, novamente, os fechamentos co-fabricados, internos, são necessários independentemente do custo. Para melhor distribuição dos esforços na borda, é aconselhável que a extensão da largura do dispositivo seja da mesma ordem de grandeza da espessura do painel, como ilustrado na Figura 9.7.

Observe que a colagem de dispositivos internos exige uma aderência do dispositivo tanto com a colmeia quanto com as faces, como ilustrado na Figura 9.7. Isto exige uma usinagem com tolerâncias bastante pequenas. Uma forma de contornar este problema é com o uso de adesivos em forma de espuma.

Vinculações no contorno

Os fechamentos vistos nas Figuras 9.6 e 9.7 têm, quase todos, a utilidade de permitir a vinculação do painel a uma superestrutura ou a outros painéis. O tipo de vínculo obtido pode ser totalmente rotulado, como o da Figura 9.8a, até um totalmente engastado. Fechamentos como os vistos em 9.8b são de tipo intermediário, permitindo certa rotação dependendo do comprimento e da espessura da região de fixação dos parafusos.

Frequentemente, para melhorar a resistência da borda, são introduzidos reforços nas faces de forma a distribuir melhor os esforços. Esses reforços podem ser co-fabricados ou pós-fabricados, internos ou externos, em uma ou ambas as faces. Observe que um bom projeto de reforço de faces no contorno não apenas distribui os esforços numa área maior, mas o faz da maneira o mais gradual possível.

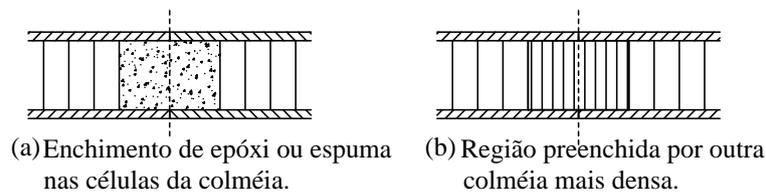


Figura 9.9: Reforços colados, pré-fabricados, para suportar cargas concentradas. [21].

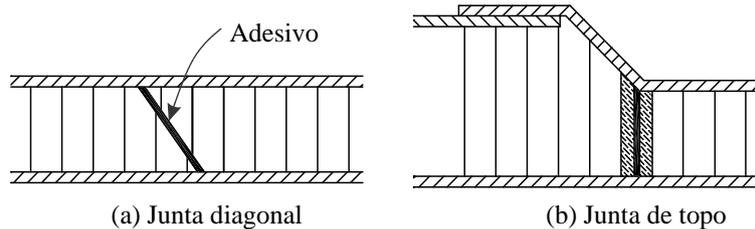


Figura 9.10: Formas de transição entre colméias de diferentes espessuras ou densidades [21].

Reforços para cargas concentradas

A resistência ao esmagamento de um painel (ver Figura 9.5g) pode ser aumentada com reforços localizados, co-fabricados com o painel, como ilustrado na Figura 9.9. Pode-se fazer um enchimento prévio das células de colméia com espuma, ou escavar uma região para abrigar um bloco sólido ou uma parte de colméia mais densa. Cargas em linha também podem ser suportadas alocando perfis extrudados.

Conexões entre painéis

Um primeiro tipo de conexão, que na realidade não se faz entre painéis, é aquele ilustrado na Figura 9.10. São formas de conectar num mesmo painel partes de colméia de diferentes espessuras ou densidades. Em geral, a junta diagonal da Figura 9.10a é mais resistente que a de topo da Figura 9.10b.

Alguns projetos de conexões entre painéis são ilustrados na Figura 9.11. Apesar de poder ser feita por dispositivos acoplados aos dispositivos de fechamento dos painéis, a conexão é mais eficiente quando os próprios dispositivos de fechamento são conectáveis entre si, como aqueles ilustrados na figura. As diferenças entre os diversos projetos residem no ângulo de conexão ou no grau de suavidade das superfícies.

Fixação de painéis a superestruturas

Claramente uma colméia ou outro tipo de núcleo qualquer não se presta à fixação de parafusos para a transferência de cargas nos níveis em que o próprio painel, como um todo, deveria ser capaz de suportar. Novamente, a solução adotada consiste na instalação de reforços ou buchas de vários tipos, como

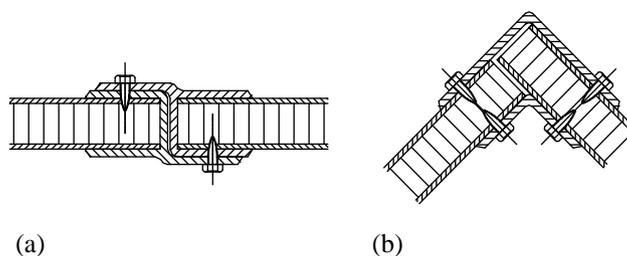


Figura 9.11: Tipos de conexão entre diferentes painéis [21].

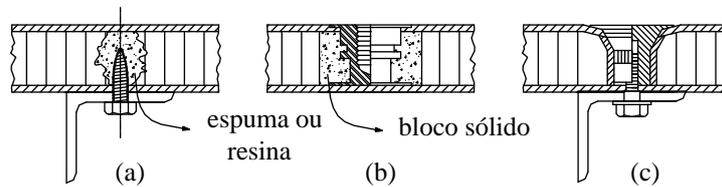


Figura 9.12: Dispositivos de fixação por parafuso [21].

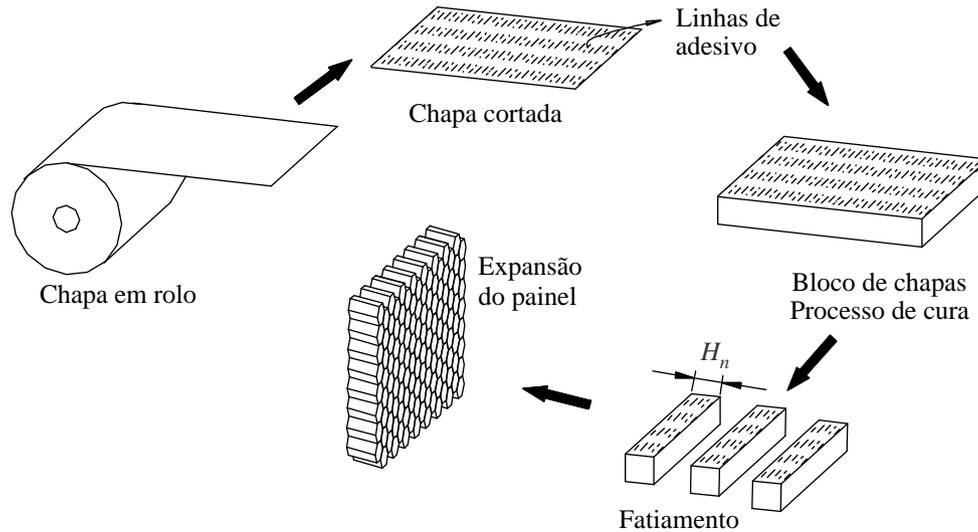


Figura 9.13: Produção de colméia pelo processo de expansão [21].

aqueles ilustrados na Figura 9.12. Apenas no caso da Figura 9.12a o parafuso dispensa bucha, sendo aplicado diretamente sobre um enchimento de espuma ou resina previamente aplicado em algumas células. No caso 9.12b, por exemplo, a bucha é montada simultaneamente a um bloco de resina. Alguns casos aceitam arruelas para melhor distribuição dos esforços. Na maioria dos casos a bucha e o parafuso são passantes através do painel, mas podem também ser unilaterais.

9.5 Manufatura de colmeias

As colmeias são fabricadas principalmente pelo chamado **processo de expansão**, ilustrado na Figura 9.13. O processo envolve o corte de chapas e seu empilhamento num bloco compacto após a aplicação de linhas paralelas de adesivo. O conjunto é prensado e curado. Em seguida o bloco é fatiado na largura H_n desejada para a espessura do núcleo. A fatia é então expandida até que as células atinjam as proporções desejadas, quando se tem a colmeia pronta.

Um segundo processo de fabricação, mais comum em colmeia de alta densidade, feita por chapas mais espessas, é o **processo de corrugamento**, ilustrado na Figura 9.14. Aqui a chapa é continuamente corrugada e em seguida cortada no comprimento desejado. Adesivo é aplicado, os corrugados são empilhados num bloco e o conjunto é comprimido durante a cura. Finalmente o bloco corrugado é fatiado nas espessuras desejadas para o painel-sanduiche. Note que tanto a etapa de expansão do bloco quanto a forma do cilindro corrugador definem a geometria da célula na colmeia.

A Figura 9.15a mostra uma colmeia de células hexagonais regulares, enquanto a colmeia da Figura 9.15b, de hexágonos alongados, foi obtida simplesmente excedendo o processo de expansão. Na Figura 9.15a temos ainda uma notação para as **direções principais de uma colmeia**, direções L , W e T . Em relação à notação padrão dos eixos principais de ortotropia de uma lâmina, os eixos principais de uma colmeia podem ser facilmente identificados. A direção normal T é a direção principal 3, enquanto L pode ser identificado com o eixo 1 ou com o eixo 2, da mesma forma que W . A colmeia regular apresenta rigidez ao cisalhamento no plano LT maior que no plano WT . As colmeias distorcidas, como

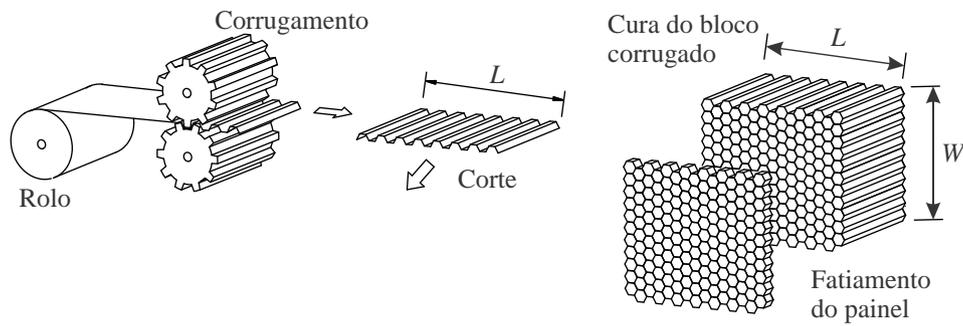


Figura 9.14: Produção de colméias pelo processo de corrugamento [21].

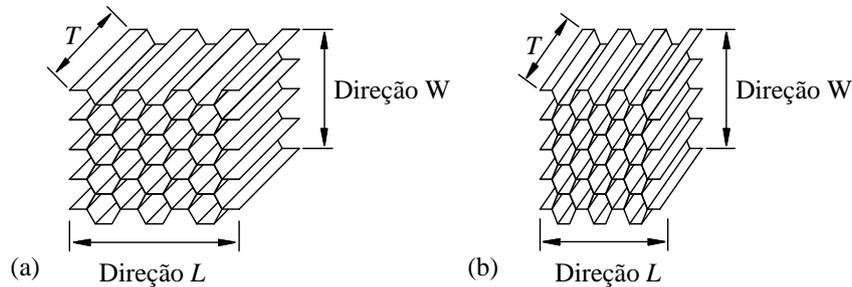


Figura 9.15: Diferentes proporções de células numa colméia hexagonal, (a) regulares; (b) sobre-expandidas ou alongadas [21].

a da Figura 9.15b, apresentam um incremento de rigidez cisalhante na direção W . Os módulos de elasticidade longitudinal nas três direções são também obviamente diferentes, embora os das direções W e L sejam irrelevantes comparados a E_T .

Uma outra característica das colmeias sobre-expandidas é que elas oferecem maior facilidade de serem flexionados sobre superfícies curvas em torno do eixo W .

Note que a forma hexagonal é apenas a forma mais óbvia, mais usada e mais simples de célula. Mas, no processo de corrugamento, ferramentas podem ser preparadas para dar ao corrugado diversas formas, não necessariamente com superfícies de células planas que gerarão células com melhores características de flexibilidade ou de rigidez ao cisalhamento.

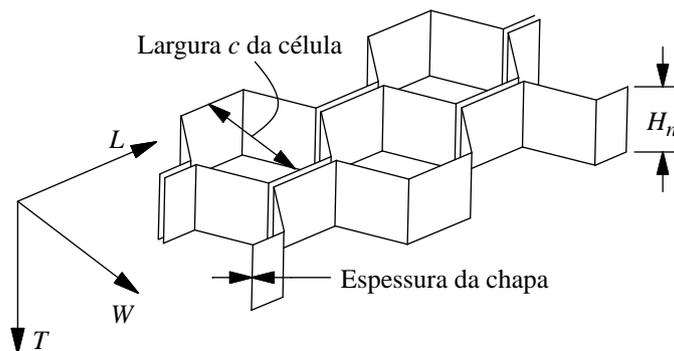


Figura 9.16: Algumas das dimensões de uma colméia hexagonal.

9.6 Propriedades e ensaios de núcleos e sanduíches

Ao longo dos anos uma longa série de ensaios tem sido proposta e discutida para a determinação de propriedades que se associem aos diversos modos de falha identificados nos painéis-sanduíches.

Algumas dessas proposições são posteriormente transformadas em normas por entidades nacionais ou internacionais. As discussões alongadas e a diversidade de propostas para a determinação de um mesmo parâmetro se devem a uma série de fatores. Por exemplo, o ensaio proposto deve envolver o custo mais baixo possível, com corpos de provas pequenos, simples de construir, com equipamento simples, de preferência padrão. Também, a determinação da propriedade desejada deve, se possível, ser feita com fórmulas algébricas simples. Isto implica que o estado de tensões e deformações imposto no corpo de prova deve ser o mais simples e uniforme possível.

Comentamos a seguir aspectos de ensaios propostos na literatura e de alguns ensaios adotados em norma, principalmente da ASTM (American Society for Testing and Materials). As Tabelas 9.4 e 9.5 apresentam uma amostra de propriedades típicas de colmeias que podem ser obtidas a partir de dados de fabricante [20]¹. Algumas das dimensões das células são definidas na Figura 9.16, enquanto o significado de diversas das propriedades mostradas são descritos nas seções seguintes.

Tabela 9.5: Propriedades de alguns tipos de colméias de resina reforçada. Ver o significado das abreviações, variáveis e unidades na tabela anterior.

c	h_c	ρ_n	Compressão na direção T				Cisalhamento transversal			
			Z_c	Z_c	Z_{esm}	E_t	S_{LT}	G_{LT}	S_{WT}	G_{WT}
mm	μm	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	não-estabiliz.	estabiliz.		mód.	resist.	mód.	resist.	mód.
(pol.)			méd/mín	méd/mín	méd	méd	méd/mín	méd	méd/mín	méd
Colméia de vidro/fenólico										
4,8		65	3,5/3,0	4,0/3,5		400	2,0/1,5	90	1,0/1,0	50
(3/16")		110	8,0/6,0	9,0/7,0		1.000	4,5/3,5	210	2,5/2,0	100
		200	1,6/12,5	18,0/14,0		1.800	7,0/5,5	350	5,0/4,0	200
6,4		50	2,9/2,0	3,0/2,9		300	2,0/1,0	70	1,0/0,8	35
(1/4")		80	5,0/4,0	6,0/4,5		600	3,0/2,0	140	1,5/1,0	70
		100	7,0/6,0	8,0/6,5		850	4,0/3,0	170	2,5/2,0	90
9,5		35	1,0/1,0	1,0/1,0		90	1,0/0,5	40	0,5/0,5	20
(3/8")		70	4,0/3,0	5,0/4,0		450	2,0/2,0	100	1,5/1,0	60
		130	10,0/7,0	10,0/8,0		1.050	5,0/4,0	190	3,0/2,5	130
Colméia de vidro/poliéster										
4,8		70	3,0/2,5	4,0/3,5		550	2,0/1,5	100	1,0/0,5	35
(3/16")		150	12,0/10,0	12,0/9,0		1.250	3,5/2,5	140	2,0/1,5	50
6,4		65	3,0/2,0	4,0/3,0		470	1,5/1,	90	1,0/0,6	40
(1/4")		130	10,0/7,0	11,0/7,0		1.100	3,0/2,0	130	1,5/1,0	50
9,5		40	1,5/1,0	2,0/1,5		340	1,0/2,0	70	0,5/0,5	30
(3/8")		70	3,0/2,5	4,0/3,5		550	2,0/1,5	100	1,0/0,5	40

9.6.1 Cisalhamento de núcleos

O método mais óbvio para medir o **módulo e a resistência ao cisalhamento** nas direções LT e WT de uma colméia é aquele ilustrado na Figura 9.17a, também adotado na norma ASTM C 273-61 [10]. Por motivos de uniformidade nos resultados, entre outros, a norma indica algumas proporções no corpo de provas:

$$\left\| \begin{array}{l} L \gtrsim 12H_n, \\ \text{tolerância em } H_n \text{ de } \pm 0,2 \text{ mm ou } \pm 0,5 \%, \\ \text{tolerância em } L \text{ e } b \text{ de } \pm 1,0 \%, \end{array} \right. \quad (9.1)$$

onde L, H_n e b são as dimensões do corpo de provas como ilustrado na Figura 9.17. Normalmente, pelo menos cinco corpos de prova precisam ser ensaiados.

¹ Os dados das tabelas são apenas indicativos, apontando ordens de grandeza e valores típicos. Valores precisos devem

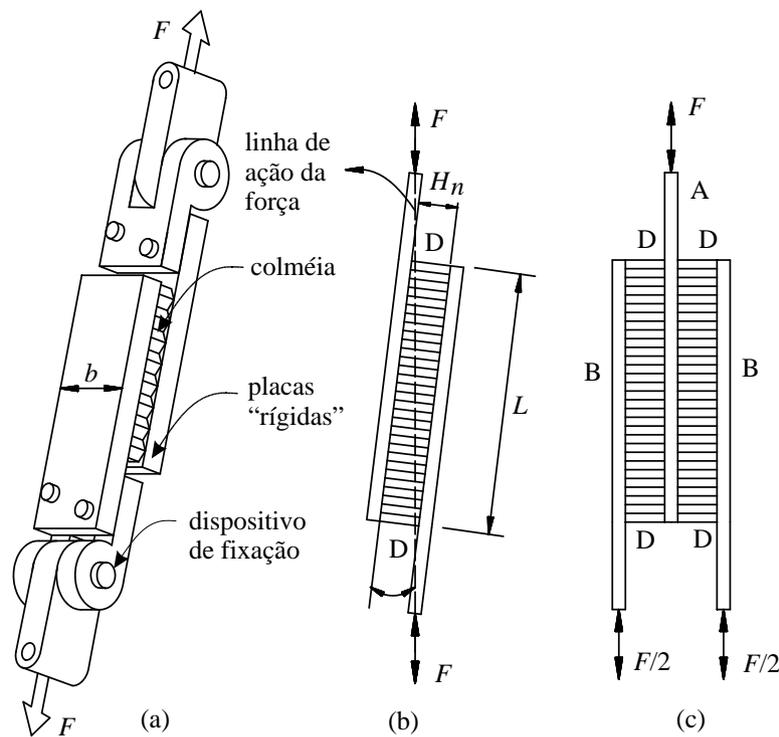


Figura 9.17: Ensaios propostos para o cisalhamento transversal de colméias. (a) Visualização do aparato de testes da ASTM; (b) esboço do aparato (a); (c) outro tipo de ensaio proposto.

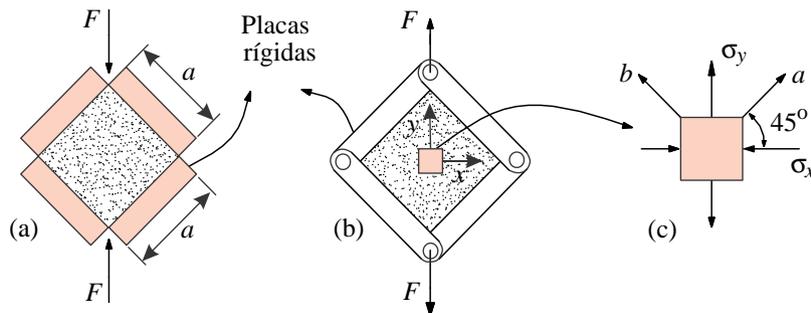


Figura 9.18: Aparato de cisalhamento em bloco 3-D de material.

Observando o esquema da Figura 9.17b, podemos fazer os cálculos. A componente de força tangencial é $F \cos \alpha$. Aplicado o carregamento, mede-se a força F aplicada e o deslocamento relativo Δ entre as placas rígidas. Assim, a tensão, a deformação média e o módulo de elasticidade cisalhante do núcleo são:

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{F \cos \alpha}{Lb} \\ \gamma &= \frac{\Delta}{H_n} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \boxed{G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{H_n F \cos \alpha}{bL\Delta}} \quad (9.2)$$

Em caso de colmeia, dependendo da posição do corpo de provas, obteremos a estimativa de G_{WT} ou G_{LT} . A resistência é obtida simplesmente estendendo o carregamento até que a falha venha a ocorrer. O que se entende por falha deve ser previamente definido para o ensaio, e registrado no relatório. Considerando o ângulo α bastante pequeno, a norma ignora o termo $\cos \alpha$ na equação acima.

Uma série de críticas pode ser feita ao ensaio da Figura 9.17a. Kelsey [113] faz um estudo desse

ensaio e aponta algumas das deficiências:

- existe uma componente normal de força aplicada sobre a colmeia;
- existe flexão das placas “rígidas”;
- falta uniformidade nas tensões ao longo do núcleo;
- os extremos da colmeia, pontos D da Figura 9.17b, estão de fato sob tensão cisalhante nula.

Isto torna clara a inexactidão da hipótese de tensões uniformes, usadas nos cálculos em (9.2). O ensaio proposto na forma mostrada na Figura 9.17c, com placas paralelas, possui as mesmas deficiências do ensaio de placa única, exceto pela ausência da tensão normal. Entretanto, o ensaio é aparentemente algo mais complexo e caro.

Um outro processo de ensaio, que apresenta muito menos problemas, é aquele ilustrado na Figura 9.18. Um bloco quadrado do material é colocado entre quatro placas rígidas. O conjunto é comprimido ao longo de uma diagonal, gerando um estado quase uniforme de cisalhamento. Na Figura 9.18b se observa uma variação proposta por Penzien [155], em que as placas são articuladas entre si, permitindo a aplicação de carga de tração. A Figura 9.18c mostra um diagrama de corpo livre de um elemento diferencial do bloco. Se as medidas do bloco forem $a \times a \times H$, as tensões no bloco são

$$\sigma_x = -\sigma_y = \bar{\sigma} = \frac{F}{Ha\sqrt{2}}. \tag{9.3}$$

Transformando estas tensões, temos que a tensão cisalhante máxima, nas direções dos eixos a - b orientados a 45° com os eixos x - y , são $\tau_{\max} = \bar{\sigma} = F/Ha\sqrt{2}$. Quanto às deformações, temos que

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_y = e, \tag{9.4}$$

que devem ser medidas durante o ensaio. Essas deformações implicam numa deformação cisalhante máxima γ_{\max} nas direções a - b de $\gamma_{\max} = 2e$. Assim, o módulo de elasticidade cisalhante obtido do ensaio é

$$G = \frac{\bar{\sigma}}{2e} \tag{9.5}$$

Uma restrição a este ensaio é que, por causa do desenvolvimento de flambagem, ele não se presta ao ensaio de corpos de provas em forma de chapa, apenas a blocos.

As Tabelas 9.4 e 9.5 mostram valores de resistência cisalhante S_{LT} e S_{WT} e respectivos módulos G_{LT} e G_{WT} para algumas colmeias comerciais, obtidos pelo ensaio da Figura 9.17a.

9.6.2 Propriedades compressivas de núcleos

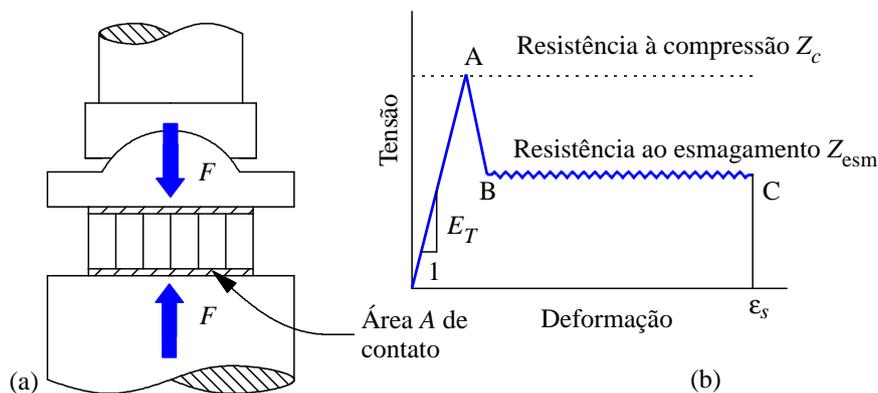


Figura 9.19: (a) Ilustração do ensaio de compressão de colméia na direção normal T [20]; (b) diagrama típico de $carga \times deformação$.

A Figura 9.19 ilustra um ensaio de compressão de um corpo de provas de colmeia, carregado na direção transversal. A Figura 9.19b ilustra os três tipos de resultados que podem ser obtidos:

uma análise mecânica, é bastante versátil, podendo produzir tanto informações sobre as propriedades globais do comportamento do sanduíche quanto sobre suas componentes. Podem ser obtidos: as resistências à tração e a compressão das faces, a rigidez do conjunto e o módulo de elasticidade e resistência cisalhantes do núcleo.

Tabela 9.6: Outras normas de ensaio aplicáveis a sanduíches.

1	Ensaio de compressão coplanar de sanduíche, ASTM C364-61.
2	Ensaio de flexão em três e quatro pontos para sanduíche, ASTM C 393-62 [8].
3	Tenacidade de compensados, ASTM D 3499-76, [13].
4	Tração em compensados, ASTM D 3500-76, [14].
5	Compressão em compensados, ASTM D 3501-76, [15].
6	Absorção de umidade em produtos de madeira, ASTM D 3502-76, [16].
7	Efeito de dilatação higroscópica em produtos de madeira, ASTM D 3503-76, [17].

9.7 Espumas – Tipos e propriedades

Os núcleos de espuma são compostos por espuma formada por plásticos expandidos e solidificados. Vários tipos de espumas plásticas estão disponíveis no mercado, como a espuma de poliuretano, de PVC ou de silicone. Essas espumas podem ser adquiridas em forma líquida, para ser combinadas com os reagentes no local, ou podem ser adquiridas em forma de pranchas. Na forma líquida, os componentes começam a reagir tão logo sejam misturados e expandem-se naturalmente em forma de espuma, que posteriormente é curada. A cura pode ser à temperatura ambiente ou forçada. A tendência da espuma é aumentar de volume até um nível de mínima densidade. A densidade final pode ser controlada restringindo-se o volume máximo permitido para a expansão.

As propriedades termomecânicas das espumas variam principalmente com a densidade imposta no processo de solidificação. A Tabela 9.7 mostra valores médios de algumas destas propriedades. Algumas propriedades são bastante características das espumas plásticas. Elas têm baixa condutividade térmica, em geral têm alta resistência à água, altas taxas resistência/peso, baixa permeabilidade à umidade e baixa resistência à corrosão.

9.8 Faces – Materiais e propriedades

A Tabela 9.8 ilustra uma coletânea de materiais comercialmente usados como faces de sanduíches, junto a valores típicos de algumas propriedades.

9.9 Avaliação das constantes elásticas de uma colmeia

Normalmente, na operação de projeto de painéis-sanduiche, simplesmente escolhem-se faces e núcleos a partir de propriedades obtidas experimentalmente em sanduíches fabricados comercialmente. Consideramos nesta seção uma operação diversa, em que se deseja projetar um *honeycomb* para atingir determinados valores de rigidez, ou reversamente, se deseja estimar analiticamente a rigidez do *honeycomb* dada sua configuração geométrica. Esta última operação é o objeto desta seção.

Existem algumas teorias para prever as propriedades de uma colmeia. Kelsey [113] faz uma análise detalhada que prevê limite superior e inferior para o módulo de elasticidade cisalhante. Uma análise mais simples e prática é fornecida por Chang e Ebciochi [55], e existe também a análise de Penzien [155]. Uma previsão consistente para o coeficiente de Poisson não é ainda disponível, é apenas comentada por Hoffman [100].

Tabela 9.7: Propriedades termomecânicas típicas de espumas e plásticos expandidos e madeira tipo balsa. Tensões e módulos em MPa. Os valores de G_{WT} e S_{WT} são idênticos a G_{LT} e S_{LT} , respectivamente.

Propriedades (Allen [27])	PVC	Fenólicos	Poliuretano	Poliestireno (isopor)	Balsa
Densidade ρ_n , kg/m ³	65	55	70	40	92
Módulo de elasticidade E_T	55	7	19	11	2.450
Tensão limite a compressão Z_{esm}	1	0,17	0,5	0,27	6,3
Módulo de cisalhamento G_{LT}	9	3,5	5,0	4,5	105
Tensão limite cisalhante S_{LT}	1,15	0,14	0,6	0,3	
Coefficiente dilatação térmica α , 10 ⁻⁶ °C ⁻¹			108		
Coef. de absorção de água β , % em volume			1,3		
Condutividade térmica a 37,5°C, W/m°C			0,0354		
Temperatura máxima de serviço contínuo, °C			120		

Tabela 9.8: Propriedades típicas de faces de sanduíches. (1) Módulo de elasticidade; (2) Tensão de escoamento ou limite de ruptura. (3) Coeficiente de Poisson. (4) Densidade. (5) As espessuras de chapas de alumínio são normalizadas pela norma DIN 1783 nos valores 0,4/0,5/0,6/0,8/ 1,0/1,2/1,5/1,8/ 2,0/2,5/3,0/3,5 /4,0/5,0/6,0/8,0/ 10,0/12,0/15,0 mm. (6) c e t indicam valores à compressão e tração, respectivamente.

Material	$E(1)$ GPa	$\sigma_E(2)$ MPa	$\nu(3)$	$\rho(4)$ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Aspectos gerais
Alumínio(5)					
1100-H14	70	90c(6)	0,33	2.710	custo médio, resistência química
5052-H34	70	165c	0,33	2.710	custo médio, resistência a intempéries
6061-T6	70	240c,t	0,33	2.710	soldável, trabalhável
2024-T3	72	300t	0,33	2.710	alta resistência, resistência à corrosão, temperável
Aço carbono	200	350	0,3	7.680	baixo custo, pesado
Inox 304	190	250	0,24	7.680	alto custo, resistência à corrosão
Woven grafite/epóxi					
282-F155	55	60	0,1	1.540	
Fita grafite/epóxi					
TXX145-F155	120	1.300	0,1	1.690	alto custo, leve
Woven kevlar/epóxi					
K49-285-F155	28	200c	$\simeq 0$	1.400	leve, baixa resistência à compressão
Fita kevlar/ epóxi					
	65	250c	$\simeq 0$	1.400	custo médio
Vidro/poliéster					
	6,5	100	0,14	1.400	custo bastante baixo
Vidro woven roving/ poliéster					
	12	250	0,14	1.400	custo bastante baixo
Woven glass/epóxi					
1581-F155	25	450	0,14	1.900	baixo custo, resistente
Fita vidro/epóxi					
T25-285-F155	50	850	0,14		custo médio, resistente
Compensado/pinho					
	12	20	0,1	600	baixo custo
Madeira endurecida e temperada para 1.000 kg/m ³					
	4,5	25	0,1	1.000	baixo custo

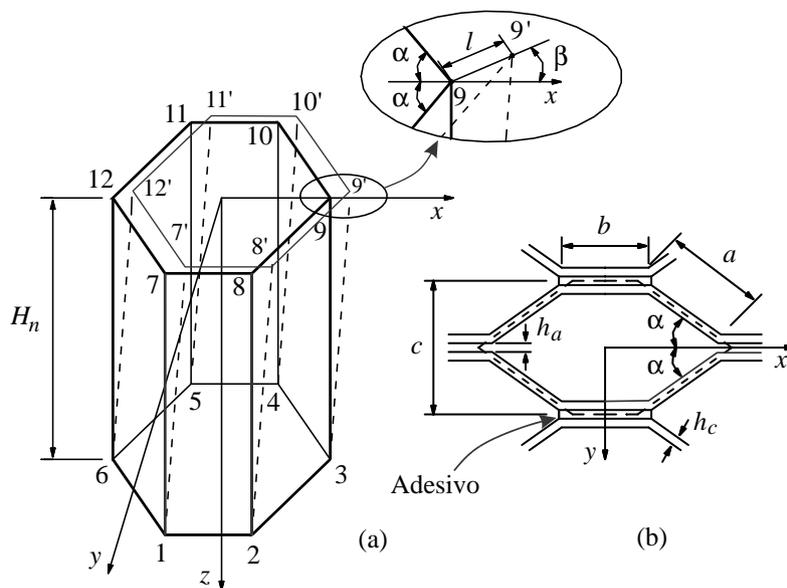


Figura 9.20: Parametrização de uma célula e idealização do campo de deslocamentos [55].

$$\tau_\beta = \frac{lG_{ch}h_c}{aH_n} \left[\frac{\cos^2 \beta + \frac{a}{2b} (\cos^2 (\alpha - \beta) + \cos^2 (\alpha + \beta))}{\left(1 + \frac{a}{b} \cos \alpha\right) \sin \alpha} \right]. \quad (9.15)$$

A deformação cisalhante sofrida pela célula como um todo associada ao deslocamento inicial l aplicado na direção β é $\gamma = l/H_n$. Pode-se então usar (9.15) numa relação constitutiva linear do tipo $\tau_\beta = G_\beta \gamma$ e obter uma expressão para o **módulo cisalhante equivalente da colmeia** como

$$\frac{G_\beta}{G_{ch}} \frac{a}{h_c} = \frac{\left(1 + \frac{b}{a}\right) + \left[\left(\frac{b}{a} + 1\right) - 2\sin^2 \alpha\right] \cos 2\beta}{2\left(\frac{b}{a} + \cos \alpha\right) \sin \alpha} \quad (9.16)$$

As propriedades ortotrópicas da colmeia são obtidas fazendo $\beta = 0$ e $\beta = 90^\circ$, donde resulta

$$\begin{aligned} \frac{G_{xz}}{G_{ch}} \frac{a}{h_c} &= \frac{\frac{b}{a} + \cos^2 \alpha}{\left(\frac{b}{a} + \cos \alpha\right) \sin \alpha} \\ \frac{G_{yz}}{G_{ch}} \frac{a}{h_c} &= \frac{\sin \alpha}{\frac{b}{a} + \cos \alpha} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad g_x = \frac{G_{yz}}{G_{xz}} = \frac{\sin^2 \alpha}{\frac{b}{a} + \cos^2 \alpha} \quad (9.17)$$

Os eixos na Figura 9.20 são orientados de forma que se tem as correspondências $G_{xz} = G_{LT}$ e $G_{yz} = G_{WT}$, onde a segunda notação é a usual em publicações de sanduíches e colmeias. Observe que os módulos normalizados dependem apenas do ângulo α do hexágono e do aspecto b/a . As Figuras 9.21 e 9.22 mostram a evolução desses módulos com b/a para alguns valores de α .

9.9.1 Densidade de uma colmeia

Definindo ρ_{ch} e ρ_a como as densidades da chapa da colmeia e do adesivo, a densidade média da colmeia ρ_n é dada por

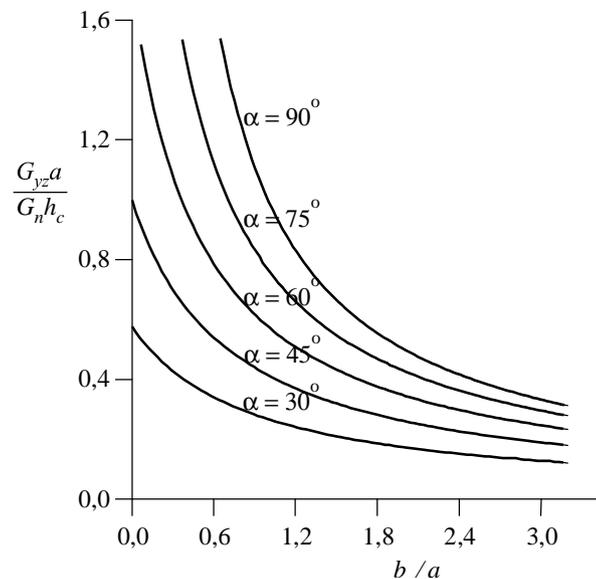


Figura 9.22: Módulo cisalhante equivalente G_{yz} da colmeia, dado por (9.17).

Se buscamos um núcleo isotrópico, basta fazer $g_\beta = 1$ e buscar as raízes de (9.21). Isto resulta em

$$\boxed{\frac{b}{a} = 2\text{sen}^2\alpha - 1} \quad (9.22)$$

Note que a colmeia é isotrópica se $g_\beta = 1$ para qualquer valor β . Por exemplo, para $b/a = 0,5$, o ângulo da célula que a torna isotrópica é $\alpha = 60^\circ$. Outras combinações de geometria para colmeias isotrópicas são vistas na Figura 9.23.

9.9.3 Minimização da densidade da colmeia

A equação (9.19) pode ser usada para facilmente fornecer o ângulo α que minimiza a densidade para valores dados de ρ_{ch} e a/h_c . Ignorando a presença do adesivo, e diferenciando o lado direito de (9.19) em relação a α , obtém-se

$$\boxed{\cos \alpha = \frac{1}{4} \left[\sqrt{\left(\frac{b}{a}\right)^2 + 8} - \frac{b}{a} \right]} \quad (9.23)$$

A Figura 9.23 mostra a plotagem de α versus b/a . Outras propriedades de uma colmeia, como a resistência à compressão, foram objeto de estudo visando sua previsão analítica, como em Ringelsteller [169] e Norris [143].

9.10 Exercícios

- 9.1 Qual o princípio de funcionamento de uma viga-sanduíche? Quais os requerimentos para o material do núcleo? E das faces?
- 9.2 Comente três vantagens e três desvantagens no uso de painéis-sanduíche.
- 9.3 Descreva os seguintes processos de falha em painéis sanduíche: *wrinkling*, *dimpling* e cisalhamento do núcleo.
- 9.4 Caracterize os fechamentos co-fabricados e os pós-fabricados; em que situações cada um é mais adequado?