

3

Material com gradação funcional

O capítulo contém uma breve descrição sobre materiais compósitos e Materiais com Gradação Funcional (MGF), além de apresentar algumas leis de variação das propriedades dos materiais ao longo da espessura da casca.

3.1

Introdução aos materiais compósitos

Reddy (2004) afirma que materiais compósitos são dois ou mais materiais que combinados entre si em escala macroscópica formam um único material. Segundo Jones (1975), a vantagem dos compósitos é que comumente conjugam as melhores qualidades dos materiais constituintes, e apresentam frequentemente algumas qualidades que não estão presentes nos materiais isolados.

Algumas das propriedades que usualmente são melhoradas com a formação de um compósito são descritas abaixo (Jones, 1975):

- Rigidez;
- Resistência à corrosão;
- Resistência ao desgaste;
- Peso;
- Resistência à fadiga;
- Condutividade térmica;
- Isolamento acústico.

Naturalmente, nem todas as propriedades são melhoradas ao mesmo tempo.

A utilização dos materiais compósitos não tem sua utilização apenas recentemente na história da humanidade. Jones (1975) afirma que sua origem é desconhecida. Entretanto, em toda a história humana há referências a alguma forma da utilização dos materiais compósitos.

Segundo Rezende & Botelho (2000), a partir da década de 1960, os materiais compósitos de alto desempenho foram introduzidos na indústria aeroespacial. Os mesmos autores relatam que o uso de compósitos está distribuído a nível mundial nas seguintes proporções das indústrias:

- Aeronáutica comercial 60%;
- Defesa e espaço 20%;
- Recreativo 10%;
- Outras indústrias 10%.

3.2

Introdução aos materiais com gradação funcional

O conceito de Materiais com Gradação Funcional (MGF, ou FGM do inglês *Functionally Graded Materials*) teve sua introdução em 1984 no Japão (Koizumi, 1997).

Segundo Albino (2011), os MGF são uma nova geração de compósitos formados por duas ou mais fases constituintes, cuja principal característica é possuir uma composição continuamente variável.

Na engenharia, especificamente, Albino (2011) relata que os MGF têm melhores distribuições das tensões residuais, melhores propriedades térmicas, alta tenacidade à fratura e reduzidos fatores de concentração de tensões, quando comparados com outros compósitos ou materiais homogêneos.

Um esquema que mostra a microestrutura típica dos MGF com duas fases constituintes (fase cerâmica e fase metálica) é apresentado na Figura 3.1. Percebe-

se que há uma variação gradual dos materiais constituintes. Na Figura 3.1, a cor preta representa a fase metálica e a cor branca representa a fase cerâmica.

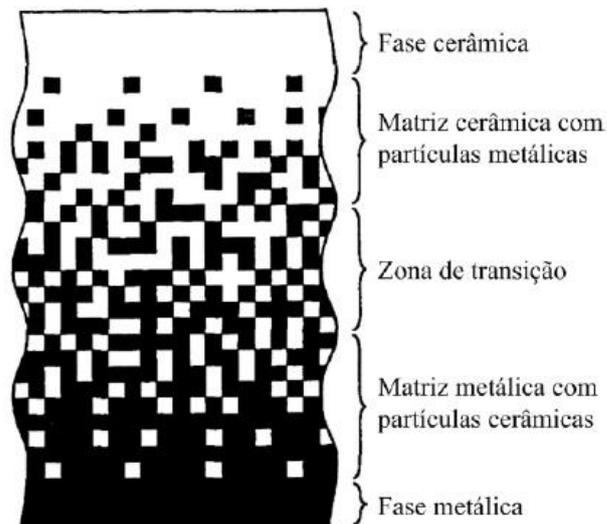


Figura 3.1 – Variação gradual dos materiais constituintes.
Fonte: Modificada de Aboudi *et al.*(1999).

Segundo Sofiyev (2004), os MGF têm recebido considerável atenção como uma classe de materiais compósitos avançados não homogêneos com a possibilidade de ampla aplicação na engenharia.

Sofiyer (2009) explica que os MGF são feitos, genericamente, a partir da mistura metal e cerâmica, por meio da variação gradual destes dois materiais, embora outras misturas apareçam também na literatura. Wu *et al.* (2004) explicam que há uma variação gradual na fração de volume dos materiais constituintes (Figura 3.1) e desta mudança contínua de variação na composição resultam as propriedades dos MGF.

Um dos processos mais comum de fabricação dos MGF, segundo Albino (2011), dá-se pelo processo metalúrgico do pó em que materiais cerâmicos e metálicos são misturados em um silo seguindo uma determinada fração de volume. Essa mistura é então pulverizada sobre uma lamina e rapidamente sintetizada usando-se *laser*². A Figura 3.2 ilustra a explicação precedente.

² Sigla em Inglês de *light amplication stimulated emission of radiation*. Em Português significa: Amplificação de luz por emissão estimulada de radiação.

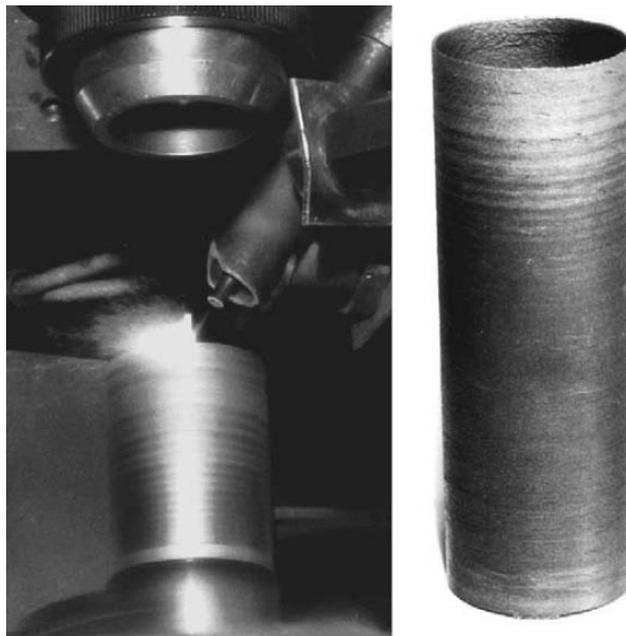


Figura 3.2 – Esquerda: Mostra a geração de um composto metal/carboneto feito com feixe de *laser*. Direita: Mostra um tubo com gradação funcional não na direção longitudinal.
 Fonte: Kieback *et al.* (2003).

Na Figura 3.3, exibe-se uma microestrutura real onde partículas de um material denominado por Kieback *et al.* (2003) de WC são introduzidos, através do processo de dispersão, na liga Cu/Mn (Cobre/Magnésio).

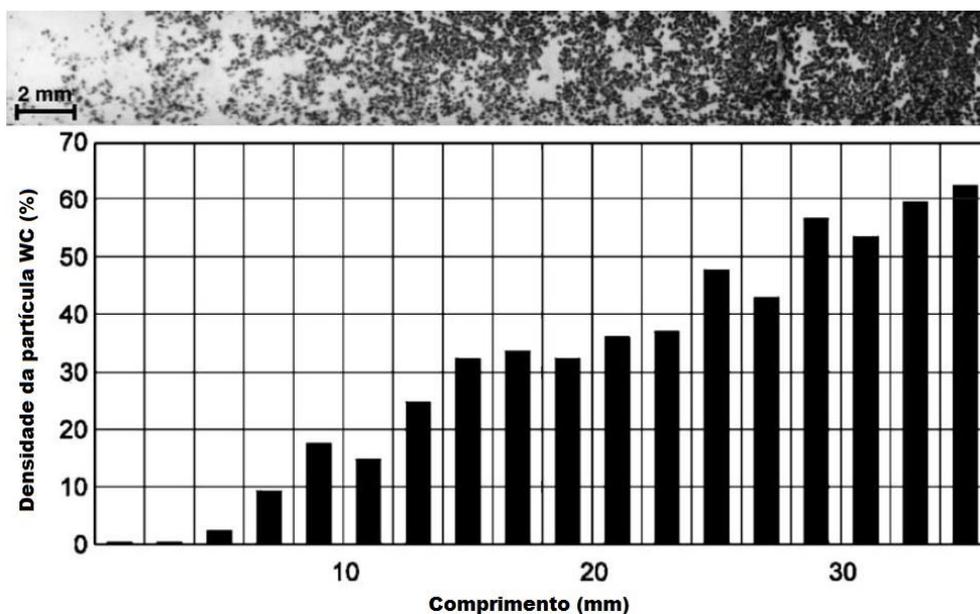


Figura 3.3 – Micrografia de um gradiente de liga de WC/Cu/Mn e a distribuição espacial da correspondente concentração de partículas WC.
 Fonte: Kieback *et al.* (2003).

Atualmente, os MGF estão disseminados em vários ramos da indústria. Como exemplo, pode-se citar a sua utilização na indústria *offshore*, mais especificamente nas estruturas de *risers* (linhas flexíveis), as quais são estruturas em formato de cascas que servem em geral para transportar óleo, desde a “cabeça” do poço até as plataformas baseadas em sistemas flutuantes (Albino, 2011).

3.3

Propriedades do MGF

Para cascas cilíndricas com gradação funcional, autores distintos em trabalhos anteriores consideram as propriedades materiais variando ao longo da espessura. Assim, nesta direção há uma variação contínua do módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson* e densidade do material.

Sofiyev (2004 e 2009) propôs para um material composto de cerâmica (*c*) e metal (*m*) a seguinte lei de variação:

$$E = (E_c - E_m)V_c + E_m \quad (3.1a)$$

$$\nu = (\nu_c - \nu_m)V_c + \nu_m \quad (3.1b)$$

$$\rho = (\rho_c - \rho_m)V_c + \rho_m \quad (3.1c)$$

onde V_c é o volume do material cerâmico, que pode variar na forma linear, quadrática, quadrática inversa e cúbica, como detalhado a seguir:

$$V_c = \bar{z} + 0,5 \quad (3.2a)$$

$$V_c = (\bar{z} + 0,5)^2 \quad (3.2b)$$

$$V_c = 1 - (0,5 - \bar{z})^2 \quad (3.2c)$$

$$V_c = 3(\bar{z} + 0,5)^2 - 2(\bar{z} + 0,5)^3 \quad (3.2d)$$

onde $\bar{z} = z/h$ é a coordenada adimensional da espessura ($-h/2 \leq z \leq h/2$).

O volume relativo dos dois materiais obedece à relação:

$$V_c + V_m = 1 \tag{3.3}$$

A variação da porcentagem volumétrica de cerâmica através da espessura da casca cilíndrica é mostrada na Figura 3.4, considerando as quatro Equações (3.2).

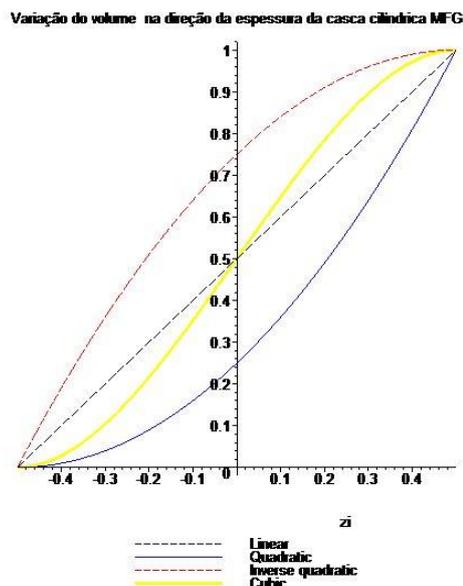


Figura 3.4 – Variação do volume de cerâmica ao longo da espessura da casca cilíndrica. O sentido horizontal representa a coordenada z , e o sentido vertical a espessura h .

Bahtui & Eslami (2005) escrevem a lei de variação dos materiais em função do volume relativo de metal e de cerâmica, f_m e f_c , respectivamente, que são determinados como:

$$f_m = \frac{V_m}{V_m + V_c} \tag{3.4a}$$

$$f_c = \frac{V_c}{V_m + V_c} \tag{3.4b}$$

com:

$$f_m + f_c = 1 \tag{3.5}$$

Os autores também propõem as expressões:

$$f_m = \left(\frac{2z + h}{2h} \right)^k \quad (3.6a)$$

$$f_c = 1 - f_m \quad (3.6b)$$

onde o índice k representa a variação do material ao longo da espessura da casca cilíndrica, sendo k igual ou maior que zero. O valor k igual a zero representa um material homogêneo (no caso metal). Quando k tende ao infinito, há a predominância de cerâmica (Bahtui & Eslami, 2005).

Para tal lei de variação dos volumes, Bahtui & Eslami (2005) estabelecem que o módulo de elasticidade e a densidade variam segundo as relações:

$$E = E_c + (E_m - E_c)f_m \quad (3.7a)$$

$$\rho = \rho_c + (\rho_m - \rho_c)f_m \quad (3.7b)$$

Bahtui & Eslami (2005) não estabelecem, contudo, uma variação para o coeficiente de *Poisson*.

3.4

Formulação do problema

Usar-se-á aqui as formulações propostas por Bahtui & Eslami (2005), considerando adicionalmente a seguinte variação para o coeficiente de *Poisson*:

$$\nu = \nu_c + (\nu_m - \nu_c)f_c \quad (3.8)$$

Assim, tem-se que:

$$E = E_c; \quad \nu = \nu_c; \quad \rho = \rho_c; \quad \text{em } \bar{z} = -0,5 \quad (3.9a)$$

$$E = E_m; \quad \nu = \nu_m; \quad \rho = \rho_m; \quad \text{em } \bar{z} = +0,5 \quad (3.9b)$$

A Figura 3.5 ilustra uma distribuição esquemática dos materiais ao longo da direção z.

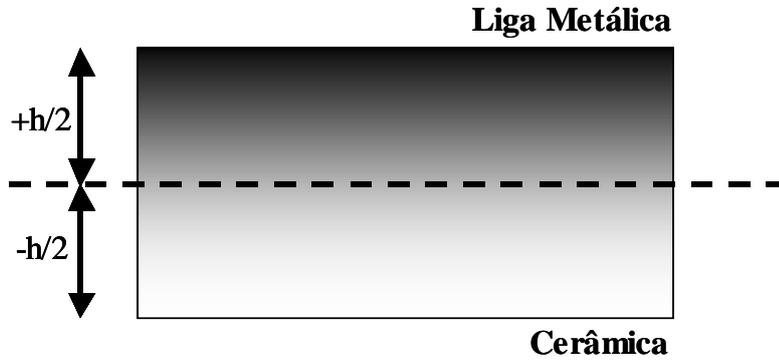


Figura 3.5 – Representação esquemática da distribuição dos materiais ao longo da espessura da casca cilíndrica.

Considerando um valor médio das propriedades da casca ao longo da espessura, tem-se, a lei constitutiva:

$$\begin{Bmatrix} \bar{\sigma}_x \\ \bar{\sigma}_\theta \\ \bar{\tau}_{x\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_{MGF}}{1 - \nu_{MGF}^2} & \frac{E_{MGF}\nu_{MGF}}{1 - \nu_{MGF}^2} & 0 \\ \frac{E_{MGF}\nu_{MGF}}{1 - \nu_{MGF}^2} & \frac{E_{MGF}}{1 - \nu_{MGF}^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E_{MGF}}{2(1 - \nu_{MGF})} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{\epsilon}_x \\ \bar{\epsilon}_\theta \\ \bar{\gamma}_{x\theta} \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

onde:

$$E_{MGF} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E(z)}{h} dz \quad (3.11a)$$

$$\rho_{MGF} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\rho(z)}{h} dz \quad (3.11b)$$

$$\nu_{MGF} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\nu(z)}{h} dz \quad (3.11c)$$

Entretanto, para levar em consideração a gradação de forma mais precisa, deve-se modificar a matriz constitutiva. Deve-se, neste caso, substituir as Equações (3.7) nas Equações (2.15), (2.18) e (2.21) e integrar os funcionais de

energia em z . Isto gera um acoplamento entre os esforços de membrana e flexão, adicionando novos termos às Equações (2.15), (2.18) e (2.21).

Assim, as relações entre os esforços e as deformações específicas passam a ser dados por:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ N_{x\theta} \\ M_x \\ M_\theta \\ M_{x\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & B_{11} & B_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & B_{12} & B_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & 0 & C_{11} & C_{12} & 0 \\ B_{12} & B_{22} & 0 & C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & B_{66} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_\theta \\ \kappa_{x\theta} \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

onde

$$\begin{aligned} A_{11} = A_{22} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11} dz & A_{12} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{12} dz & A_{66} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{66} dz \\ B_{11} = B_{22} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11} dz & B_{12} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{12} dz & B_{66} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{66} dz \\ C_{11} = C_{22} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{11} dz & C_{12} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{12} dz & C_{66} &= \int_{-h/2}^{h/2} Q_{66} dz \end{aligned} \quad (3.12)$$

e

$$\begin{aligned} Q_{11} = Q_{22} &= \frac{E_{MGF}}{1 - \nu_{MGF}^2} \\ Q_{66} &= \frac{E_{MGF}}{2(1 - \nu_{MGF})} \\ Q_{12} &= \frac{E_{MGF} \nu_{MGF}}{1 - \nu_{MGF}^2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Os termos B_{ij} expressam o acoplamento entre os esforços de membrana e flexão.