

A INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS CONSTRUTIVOS NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PEÇAS FABRICADAS PELA TÉCNICA DE MODELAGEM POR FUSÃO E DEPOSIÇÃO (FDM)

Laurence Colares Magalhães, lcmenge@yahoo.com.br
Neri Volpato, nvolpato@utfpr.edu.br
Marco Antônio Luersen, luersen@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PPGEM/DAMEC, Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba – PR, CEP 80230-901

Resumo: *Obter protótipos oriundos das tecnologias de Prototipagem Rápida (RP) é uma etapa de suma importância para o desenvolvimento de novos produtos. Em alguns casos esses protótipos apresentam características mecânicas muito inferiores às do produto final, o que impede que os projetistas extraiam o máximo de informação dos protótipos obtidos com estas tecnologias. Em particular, uma tecnologia de RP conhecida como FDM (Fused Deposition Modeling), que deposita material na forma de filamento de ABS, sofre influência da orientação de deposição dos filamentos nas propriedades mecânicas dos protótipos. Este trabalho tem como objetivo principal analisar a influência das estratégias de deposição do material de construção nas propriedades mecânicas de peças obtidas pelo processo FDM. Foram então confeccionadas amostras onde se variou a orientação de deposição dos filamentos entre as camadas. Ensaios mecânicos foram realizados para verificar a rigidez final das peças obtidas. A Teoria Clássica dos Laminados (TCL) foi utilizada para prever o comportamento mecânico das peças nestas diferentes orientações de deposição. Os resultados demonstraram divergências entre o previsto pela TCL e os ensaios mecânicos, porém foram obtidas peças estruturalmente mais rígidas quando comparadas a estratégia padrão de deposição do processo FDM.*

Palavras-chave: *prototipagem rápida, FDM, comportamento mecânico, teoria clássica dos laminados*

1. INTRODUÇÃO

Algumas tecnologias de manufatura por camadas demonstram alto potencial para fabricação de peças funcionais com propriedades mecânicas locais desejadas. A Modelagem por Fusão e Deposição (FDM – *Fused Deposition Modeling*) tem este potencial para produzir peças com propriedades localmente controladas mudando-se as densidades e orientações de deposição. Nesta tecnologia, basicamente, um filamento de material polimérico é aquecido e extrudado através de um cabeçote que se move no plano x-y. Quando o material extrudado é depositado no substrato, este resfria e solidifica no que é denominado de filamentos. A deposição destes filamentos lado a lado gera camadas que por sua vez reproduzem a geometria desejada da peça que foi obtida de um sistema CAD 3D. As camadas obtidas pelo empilhamento dos filamentos apresentam anisotropia, isto é, variações nas propriedades ao longo de diferentes direções (Bellini e Güçeri, 2003). As Peças essencialmente consistem de filamentos poliméricos parcialmente “colados” e vazios. As propriedades mecânicas de protótipos FDM são governadas por suas mesoestruturas, que são determinadas pelos parâmetros de manufatura incluindo largura do filamento, orientação de deposição e tamanho do *gap* (espaçamento) entre filamentos (Anh et al, 2002) . A partir da seleção dos parâmetros, o processo FDM pode potencialmente produzir protótipos com as propriedades desejadas, dentro de certos limites impostos pelo próprio processo.

Para se explorar completamente este potencial, soluções em torno do processo de fabricação e propriedades mecânicas de peças FDM devem ser investigadas. De acordo com Li et al (2002), entre os parâmetros de processo, as direções de deposição nas camadas e tamanhos de *gap* entre filamentos são os mais importantes para o controle das propriedades mecânicas. Assim, é essencial estabelecer modelos mecânicos de peças FDM para analisar o efeito da variação desses dois parâmetros de processo.

Nas máquinas FDM fabricadas pela Stratasys Inc., utilizada no presente trabalho, a estratégia padrão é definida pelo usuário tomando um ângulo de varredura (raster) em 45° e a partir daí há uma alternância deste ângulo em 90° entre as camadas. É também possível selecionar uma ou mais camadas e variar o ângulo individualmente. Neste trabalho é utilizado o sistema RP³ (Rapid Prototyping Process Planning) desenvolvido pelo NUFER, Núcleo de prototipagem e Ferramental da UTFPR. De acordo com Volpato et al (2006), este é um sistema de planejamento de RP que lê a geometria da peça (em formato STL - Stereolithography), faz seu fatiamento, gera as informações de preenchimento das camadas e envia estes dados à máquina de RP. Através do sistema RP³ é possível fabricar peças em diferentes ângulos

de defasagem entre camadas, bem como, tem-se a liberdade de variar outros parâmetros de deposição, como *gap* e largura dos filamentos, abrindo assim a possibilidade para a investigação do comportamento mecânico de peças com novas configurações de construção. É possível, desta forma, obter corpos-de-prova com diferentes ângulos de defasagem entre as camadas, analisar seu comportamento mecânico e qual a melhor configuração de construção para que a peça possa vir a ter o melhor desempenho para uma determinada sollicitação. Para a definição das configurações de deposição dos filamentos recorreu-se inicialmente aos conhecimentos da resistência dos materiais compostos laminados, através da Teoria Clássica dos Laminados (TCL) descrita em Jones (1975), que serviram de embasamento teórico e guiaram os experimentos realizados ao longo da pesquisa.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico de peças obtidas pelo processo FDM, levando em consideração conceitos da TCL para a variação das orientações de deposição dos filamentos nas camadas de construção.

2. A PROTOTIPAGEM RÁPIDA

No final da década de 80, um novo processo de fabricação baseado na adição de material em camadas planas foi desenvolvido. Este processo apresentava uma grande facilidade de sua automatização, pois utilizava as informações geométricas da peça a ser fabricada diretamente de um sistema CAD (Computer Aided Design) 3D para o planejamento do processo. As informações geradas eram enviadas diretamente à máquina que, uma vez preparada, executava o trabalho sem assistência de um operador, dispensando moldes e ferramentas (Carvalho e Volpato, 2007).

A grande vantagem da utilização da RP é a possibilidade de produzir um objeto físico de qualquer complexidade em um período de tempo relativamente curto. É observado que ao longo dos últimos anos os produtos lançados no mercado têm aumentado o seu nível de complexidade tanto de forma quanto de projeto. Por exemplo, se compararmos os carros dos anos 70 aos atuais, a diferença no design é impactante, e essa melhora ainda vem acompanhada de uma redução relativa no tempo de desenvolvimento do produto (Chua et al., 2003).

O processo não requer dispositivo ou ferramental especial para a fixação. Geralmente, as peças são fixadas nas plataformas de construção por suportes criados pela própria tecnologia, dispensando o projeto de qualquer tipo de dispositivo. O componente é fabricado em uma única etapa de processo. Um único equipamento é necessário para construir a peça, do início ao fim. (Carvalho e Volpato, 2007).

2.1. O Processo FDM

O processo FDM constrói o protótipo por deposição de um material extrudado. A Figura 1 apresenta o esquema de funcionamento desta tecnologia. O cabeçote extrusor, com movimentos nos eixos X-Y e posicionado sobre uma mesa com movimento no eixo Z, recebe continuamente o material na forma de um fio, aquecendo-o até o ponto semi-líquido ou pastoso. O próprio filamento de material sendo tracionado funciona como êmbolo no início do sistema de extrusão para expulsar o material por um bico calibrado. Quando o filamento fino de material extrudado entra em contato com o material da superfície da peça, ele se solidifica e adere à camada anterior. A mesa, que é constituída de um mecanismo elevador, desloca no eixo Z o valor referente à espessura de uma camada a ser depositada e o processo é repetido até que a peça seja construída.

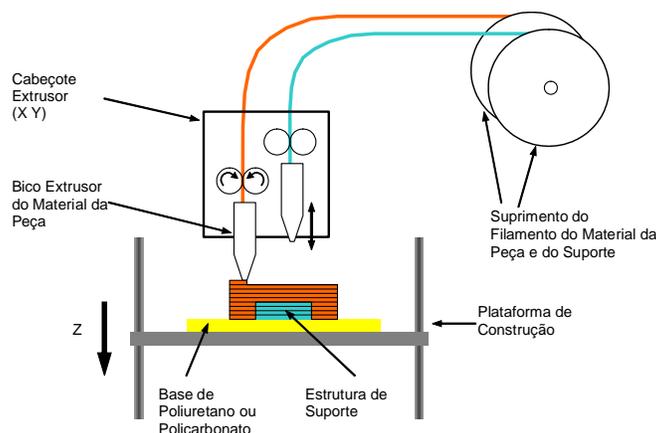


Figura 1. Princípio do processo FDM da Stratasys, Inc. (Volpato, 2007).

2.2. Parâmetros de Processo

Alguns dos principais parâmetros possíveis de serem controlados no processo são: a espessura de camada, espessura do filamento no preenchimento e contorno, os espaçamentos (*gaps*) entre filamentos depositados, ângulo de

inclinação das linhas de raster (para o caso desta estratégia) e alternância deste ângulo entre camadas sucessivas (Volpato, 2007). A Figura 2 apresenta uma representação esquemática destes parâmetros. Também podem ser ajustadas as temperaturas de envelope (interior da câmara de construção) e temperatura de extrusão.

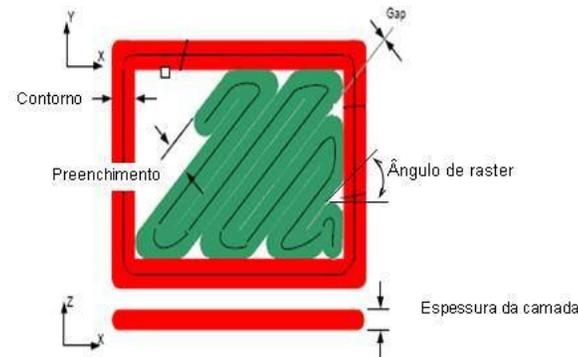


Figura 2. Representação de uma camada de deposição no processo FDM com alguns parâmetros de controle (Adaptado de Volpato, 2007).

2.3. Qualidade Estrutural de Peças FDM

Vários trabalhos (Rodriguez et al, 2000; Ahn et al, 2002; Li et al, 2002, Bellini e Güçeri, 2003) buscaram verificar a influência dos parâmetros construtivos e de processo no comportamento mecânico de peças FDM. Neste sentido, o trabalho de Ahn et al (2002) mostrou que dois parâmetros são primordiais: valores de *gap* (espaçamento entre filamentos) e orientação de deposição. O primeiro é importante na formação da mesoestrutura obtida, valores de *gap* negativos resultam em menores vazios estruturais e conseqüentemente peças mais resistentes. Dependendo da orientação de deposição, peças FDM podem apresentar boas características mecânicas em uma dada direção, porém comprometendo este desempenho em outra. A Figura 3 mostra a diferença mesoestrutural obtida variando apenas os valores de *gap* no processo. A Figura 4 mostra os resultados de resistência à tração em função da variação do ângulo de deposição quando os corpos-de-prova são carregados longitudinalmente. Fica evidente a maior resistência da peça construída quando todos os filamentos estão na direção do carregamento, onde os próprios filamentos resistem aos esforços. Quando da orientação transversal (90°), apenas a força de ligação entre filamentos resiste aos esforços, originando menores valores de resistência.

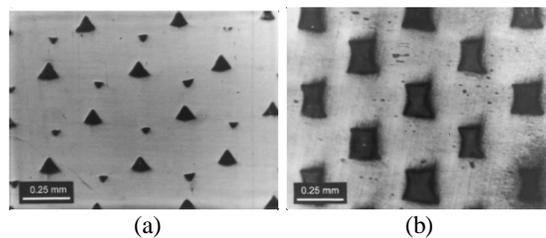


Figura 3. Diferença mesoestrutural devido a variação de *gap*. (a) $g = -25.4\mu\text{m}$, (b) $g = 76.2\mu\text{m}$ (Rodriguez et al, 2000).

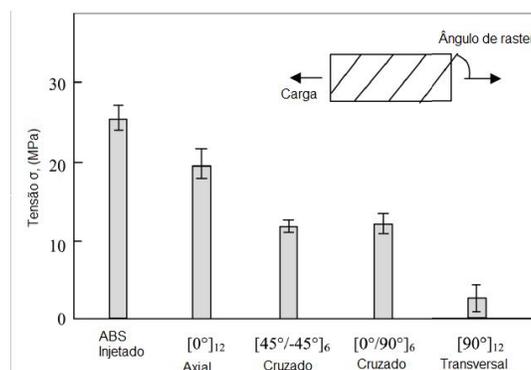


Figura 4. Resistência à tração de amostras com variação da orientação de deposição (Ahn et al, 2002).

3. MATERIAIS COMPOSTOS LAMINADOS

Segundo Rodriguez et al (2000), o material produzido pelo processo FDM fica com a forma de compostos laminados com camadas empilhadas verticalmente consistindo em uma estrutura contígua de “fibras” e vazios. Já Li et al. (2002) coloca que os protótipos em FDM são compostos ortotrópicos de filamentos de ABS, ligações entre estes filamentos e vazios. A analogia entre compostos reforçados por fibras e peças obtidas por FDM permite o uso de algumas ferramentas analíticas desenvolvidas recentemente para produtos anisotrópicos (Bellini et al., 2003). Partindo dessas afirmações, os conhecimentos da mecânica dos materiais compostos laminados, em particular da Teoria Clássica dos Laminados, podem ser utilizados para tentar prever qual o comportamento mecânico de peças obtidas pelo processo FDM, como realizado no trabalho de Kulkarni e Dutta (1999). Desta forma os materiais compostos laminados e a TCL são apresentados e utilizados como referencial teórico no desenvolvimento deste trabalho.

Os materiais compostos laminados consistem de finas camadas de material integralmente ligadas. Estas camadas podem ser do mesmo ou de diferentes materiais. Geralmente, as camadas são dispostas em diferentes orientações de fibras para se obter diferentes características em uma determinada direção. As propriedades das camadas compostas (por exemplo, resistência, rigidez, condutibilidade térmica) dependem substancialmente da forma do material de reforço no laminado. Estas propriedades são fortemente dependentes da orientação direcional de um composto laminado (Jones, 1975). Materiais que apresentam propriedades independentes da direção (mesma propriedade em todas as direções) são chamados isotrópicos. De outra forma, materiais com diferentes propriedades em diferentes direções são chamados anisotrópicos. Um caso especial de anisotropia é a existência de três planos de simetria mutuamente perpendiculares nas propriedades do material, que são chamados de eixos principais do material. Estes materiais são chamados ortotrópicos.

Geralmente, o material da matriz no composto que mantém as fibras unidas é isotrópico. As fibras, que em geral são muito mais rígidas que a matriz, também são isotrópicas. Porém, quando combinadas, macroscopicamente, as propriedades deixam de ser isotrópicas. A rigidez é um típico exemplo de propriedade que varia em função da direção em materiais compostos ortotrópicos reforçados por fibras unidirecionais.

Podem-se considerar, por exemplo, o composto laminado mostrado na Figura 5 carregado tanto ao longo das fibras direção L , ou transversalmente as fibras, direção T . Quando carregado ao longo da direção das fibras, a deformação é menor quando comparada, sob mesmo carregamento, à deformação transversal à direção das fibras. Uma vez que a deformação sob um carregamento específico reflete a rigidez do material, o composto mencionado tem propriedades de rigidez diferentes nas direções longitudinal e transversal (L e T , respectivamente).

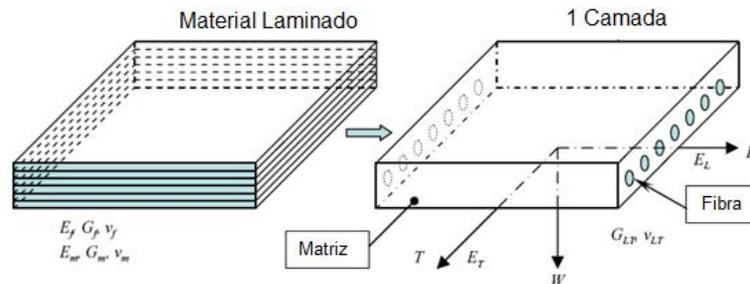


Figura 5 – Propriedades elásticas de uma camada de material composto reforçado por fibras (Adaptado de Van Boggelen, 2006).

A rigidez ao longo da direção da fibra (L) é muito próxima a do material da fibra de reforço, E_f, G_f, ν_f , (módulo elástico, módulo cisalhante e coeficiente de Poisson, respectivamente) enquanto a rigidez transversal à direção da fibra (T) é muito próxima a do material da matriz, E_m, G_m, ν_m . As propriedades mecânicas de uma camada ortotrópica em seu plano pode ser completamente descrita por quatro propriedades elásticas de rigidez. Estas constantes são os dois módulos de Young, E_L e E_T , ao longo e transverso a direção da fibra, respectivamente, o módulo cisalhante, G_{LT} e o maior coeficiente de Poisson, ν_{LT} (Jones, 1975).

Uma forma de se prever o comportamento de materiais compostos laminados, uma vez conhecidas as quatro propriedades elásticas de rigidez para uma dada camada ortotrópica em seu plano, é através da chamada TCL. Através desta teoria pode-se relacionar os diferentes esforços (forças de membrana N_x, N_y e N_{xy}), momentos (M_x, M_y e M_{xy}) com as deformações no plano médio (ϵ^0) e curvaturas (k) no laminado, através da Eq. (1) (Jones, 1975). Onde A_{ij} representam as componentes da matriz de rigidez de membrana, B_{ij} as componentes da matriz de rigidez de acoplamento entre flexão e membrana e D_{ij} as componentes da matriz de rigidez de flexão. Por exemplo, quanto maior o valor de A_{11} para um laminado, maior o valor de sua rigidez à tração ou compressão na direção x e quanto maior o valor de A_{22} maior sua rigidez na direção y . O mesmo acontece para os valores de B_{11}, B_{22}, D_{11} e D_{22} , porém nestes casos, a rigidez de acoplamento e flexão, respectivamente, nas dadas direções, serão maiores.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Métodos

O fluxograma da Figura 6 resume a proposta metodológica adotada no presente trabalho.

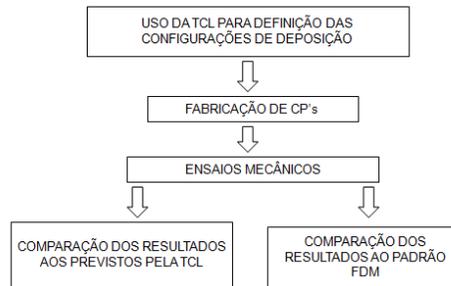


Figura 6. Fluxograma da proposta metodológica.

Recorreu-se aos conhecimentos da TCL para se prever em quais orientações de deposição as peças apresentariam um melhor perfil de rigidez na direção longitudinal do corpo-de-prova. Um programa computacional desenvolvido em Matlab foi utilizado para obtenção das matrizes **[A]**, **[B]** e **[D]** da Eq. (1) para diferentes arranjos de configuração e orientação de deposição das lâminas. Basicamente, o programa relaciona as quatro propriedades elásticas do material, E_1 , E_2 , ν_{12} e G_{12} nas duas direções principais ($1=0^\circ$ e $2=90^\circ$ em relação ao eixo x), para prever o comportamento em diferentes configurações de empilhamento e deposição. Estas propriedades elásticas, que alimentaram o programa, foram extraídas do trabalho de Li et al. (2002) que realizaram ensaios em amostras unidirecionais fabricadas por FDM a 0° , 45° e 90° para diferentes valores de *gap* entre filamentos, obtendo assim os valores das quatro propriedades.

Devido à liberdade oferecida pelo programa em Matlab em variar orientações das fibras e espessuras de camada, foi feito uma análise de quais configurações em sanduíche (configuração na qual duas camadas cruzadas são seguidas por uma exatamente em outra direção, exemplo: $[(15/-15/0)_2 / (0/-15/15)_2]$) apresentariam uma melhor rigidez em comparação ao sistema de deposição das máquinas FDM (o padrão $[45/-45]$).

Desta forma, as configurações selecionadas, bem como seus complementos (defasados em 90°) para determinação das propriedades na direção 2 (transversal) para fabricação dos corpos-de-prova são as seguintes:

1 Longitudinal - $[(15/-15/0)_2 / (0/-15/15)_2]$; 1 Transversal - $[(-75/75/90)_2 / (90/75/-75)_2]$; 2 Longitudinal - $[(75/-75/0)_2 / (0/-75/75)_2]$; 2 Transversal - $[(-15/15/90)_2 / (90/15/-15)_2]$ e 3 - $[(45/-45)_3 / (-45/45)_3]$ – Orientação padrão da máquina FDM, utilizada como referencial.

A configuração 1 apresentou os maiores valores de A_{11} e D_{11} e a configuração 2 os maiores valores de A_{22} e D_{22} dentre as avaliadas no programa em Matlab por isso foram as escolhidas para a análise experimental.

Os parâmetros de processo FDM utilizados estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de processo FDM para fabricação dos corpos-de-prova.

Item	Descrição	Valor
1	Temperatura de envelope	70°C
2	Temperatura de extrusão	270°C
3	Largura do Filamento	0.508 mm
4	Gap	-0.05 mm
5	Ø bico	0.304 mm (T12)

Em seguida as amostras foram submetidas a ensaios de tração e flexão para determinação de suas propriedades nas duas direções principais do material.

4.2. Materiais

Neste trabalho foi utilizada a máquina de prototipagem rápida FDM 2000, da empresa americana Stratasys®, com capacidade volumétrica de 250 x 250 x 250 mm e o material ABS P400 para confecção dos corpos-de-prova. Este equipamento só permite a utilização deste material.

O sistema CAD Solid Works 2008 foi utilizado para geração dos arquivos STL que foram interpretados e manipulados pelo software RP³ (*Rapid Prototyping Process Planning*) desenvolvido pelo NUFER (Núcleo de Prototipagem e Ferramental da UTFPR). O programa computacional utilizado para prever o comportamento da rigidez das amostras foi gerado no Matlab.

4.3. Ensaio mecânico de tração

Os corpos-de-prova para ensaios de tração foram confeccionados de acordo com a norma ASTM D3039/3039-95A nas dimensões e geometria apresentadas na Figura 7. Foram utilizados extensômetros do tipo Ext 250b no vão do corpo-de-prova para medição das deformações. Foram utilizadas lixas nas garras da máquina para melhorar a fixação dos corpos-de-prova. A taxa de deformação foi ajustada em 50 mm/min. Antes da realização dos ensaios os corpos-de-prova foram mantidos em condição padrão, ou seja, temperatura de 20°C, umidade relativa de 50% por um período de 48 horas.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Polímeros da Universidade de Caxias do Sul, sendo utilizada a máquina universal Emic DL 3000.

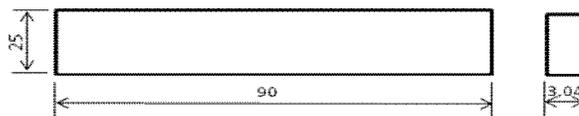


Figura 7. Geometria dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de tração de acordo com a norma ASTM D3039 (dimensões em mm).

4.4. Ensaio mecânico de flexão

Os corpos-de-prova para ensaios de flexão foram confeccionados de acordo com a norma ASTM D790 nas dimensões e geometria apresentadas na Figura 8. O tipo de ensaio foi o de flexão em três pontos onde o corpo-de-prova é suportado em dois pontos de suas extremidades e carregado no centro. Antes da realização dos ensaios os corpos-de-prova foram mantidos em condição padrão, ou seja, temperatura de 20°C, umidade relativa de 50% por um período de 48 horas.

Os ensaios de flexão também foram realizados no Laboratório de Polímeros da Universidade de Caxias do Sul, sendo utilizada a máquina universal Emic DL 3000.

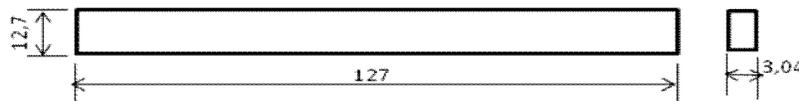


Figura 8. Geometria dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de flexão de acordo com a norma ASTM D790 (dimensões em mm).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Ensaio mecânico de tração

A Figura 9 apresenta os perfis tensão-deformação para os corpos-de-prova nas configurações de deposição estudadas.

Observa-se que a configuração 1 longitudinal [(15/-15/0)₂ / (0/-15/15)₂] apresentou grande inclinação na curva tensão-deformação e menores deformações na direção 1 (longitudinal), ou seja, maior módulo elástico. Por conseguinte, esta apresentou maior rigidez que na direção 2 (transversal), que apresentou maiores deformações antes da ruptura, mostrando um comportamento tipicamente dúctil. A configuração 2 [(75/-75/0)₂ / (0/-75/75)₂] apresentou uma grande inclinação na curva tensão-deformação em ambas as direções com menores deformações até a ruptura. A configuração 3, padrão de deposição, da máquina FDM, mostrou grandes deformações antes da ruptura.

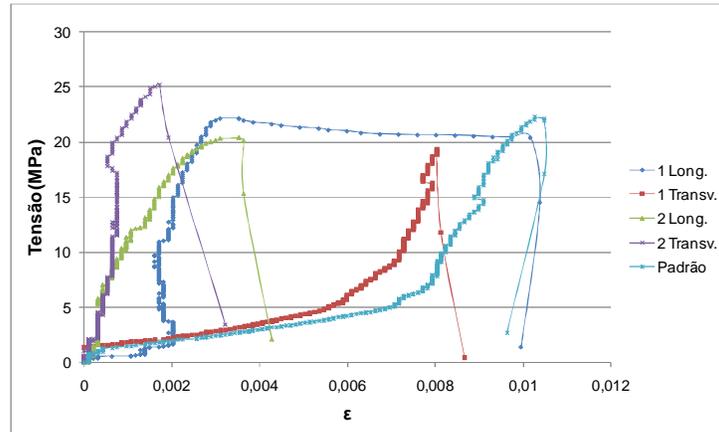


Figura 9. Curvas tensão – deformação obtidas nos ensaios de tração.

Observa-se que a configuração 1 [(15/-15/0)₂ / (0/-15/15)₂] na direção longitudinal e a configuração 2 [(75/-75/0)₂ / (0/-75/75)₂] na direção transversal apresentaram tensão de ruptura superior à configuração padrão de deposição do FDM. Analisando os dados em função dos módulos de elasticidade, ou seja, rigidez, verifica-se que em todas as configurações estudadas os valores são superiores aos da configuração padrão, desta forma, em ambas as configurações 1 e 2 obtêm-se peças mais rígidas que as fabricadas pelo padrão FDM. Estas análises podem ser melhor visualizadas no gráfico da Figura 10.

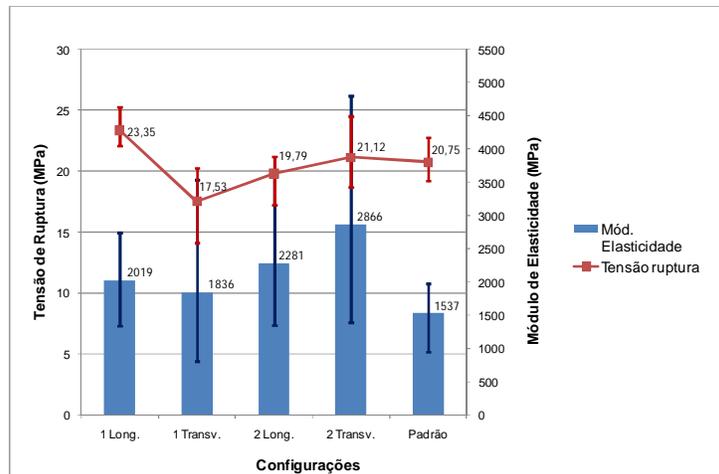


Figura 10. Comparação das tensões de ruptura e módulos de elasticidade obtidos para cada configuração (valores médios e desvio-padrão).

Através da relação dos coeficientes de rigidez A_{ij} nas direções 1 e 2 e da espessura total do corpo-de-prova é possível o cálculo do módulo de elasticidade efetivo ou equivalente E_{ef} , válido quando houver somente carregamento de membrana, o qual é dado por (Jones, 1975)

$$E_{ef} = \frac{1}{h_t} = \left(\frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{22}} \right) \quad (2)$$

onde h_t é a espessura total da peça. Este módulo, calculado analiticamente, é relacionado com o módulo obtido experimentalmente, os quais são apresentados na Figura 11. Apesar de se observar uma tendência na comparação destes módulos algumas discrepâncias são observadas. De acordo com a TCL, as amostras na configuração 1 na direção longitudinal deveriam apresentar maior módulo elástico que as amostras na configuração 2 transversal, o que não foi o ocorrido.

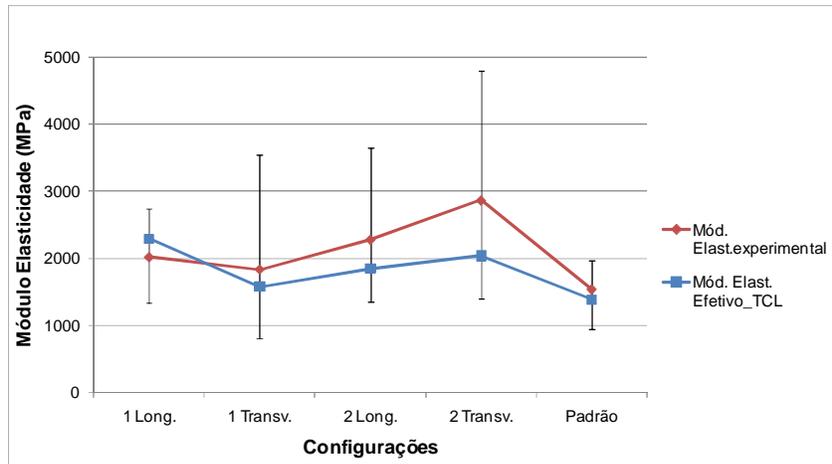


Figura 11. Módulo de elasticidade obtido nos ensaios X módulo de elasticidade efetivo previsto pela TCL.

5.2. Ensaio mecânico de flexão

A Figura 12 exibe os valores médios da relação força-deslocamento para as configurações avaliadas sob esforço de flexão.

Observa-se que a configuração 1 apresenta maior valor de tensão máxima que a configuração padrão nas duas direções. A configuração 2 na direção longitudinal também, considerando a margem de erro. Com relação aos valores de módulo de elasticidade, ou seja, em termos de rigidez, todas as configurações, exceto a 2 transversal, apresentam valor maior que o padrão. Em média, a configuração 1 apresenta uma rigidez em torno de 7% maior que a configuração padrão na direção 1 e 6% maior na direção 2. A configuração 2 apresenta uma rigidez em torno de 16% maior que a configuração padrão na direção 1 e em torno de 2% menor que a configuração padrão na direção 2. Estas análises são melhor observadas no gráfico da Figura 13.

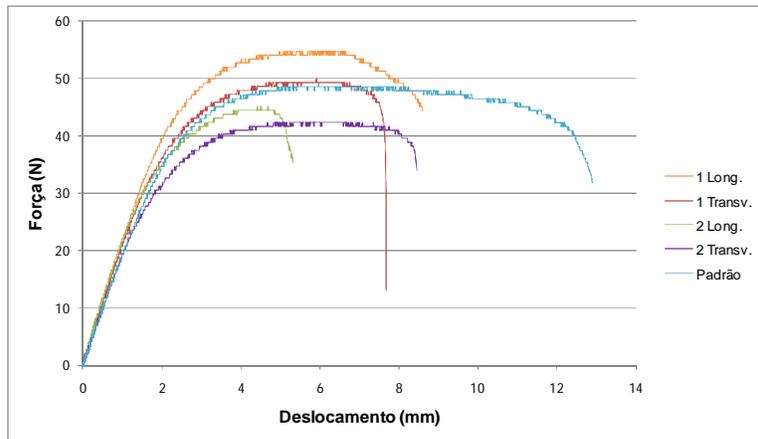


Figura 12. Comparação dos perfis Força X Deslocamentos para as configurações estudadas sob flexão.

De posse do conjunto de dados das forças e deslocamentos no decorrer do ensaio de flexão, foram estipulados três pontos na zona elástica da curva característica para cada corpo-de-prova de cada configuração e aplicadas as equações da resistência dos materiais para que se pudesse calcular o módulo de elasticidade médio e compará-lo ao módulo apresentado pelo *software* TESC versão 3.01 da máquina de ensaios universal do fabricante Emic, para verificação da confiabilidade dos resultados. A comparação está apresentada no gráfico da Figura 14, que também compara estes módulos ao coeficiente de rigidez “D” (flexional) previsto pela TCL para cada configuração.

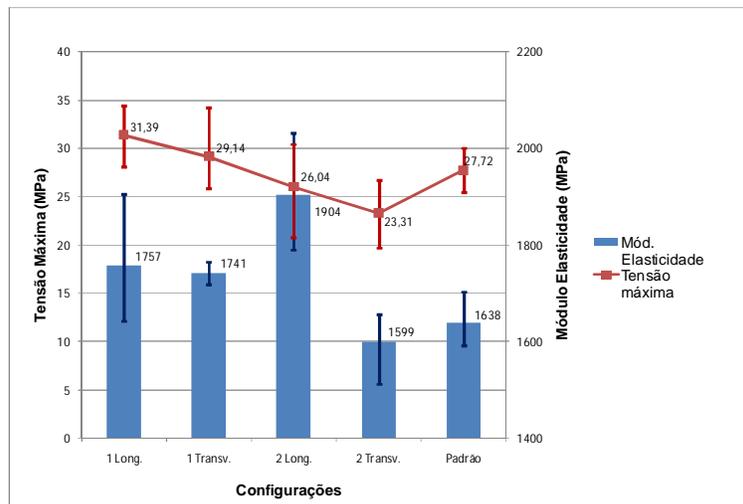


Figura 13. Comparação das tensões máximas e módulos de elasticidade obtidos em ensaios de flexão para cada configuração.

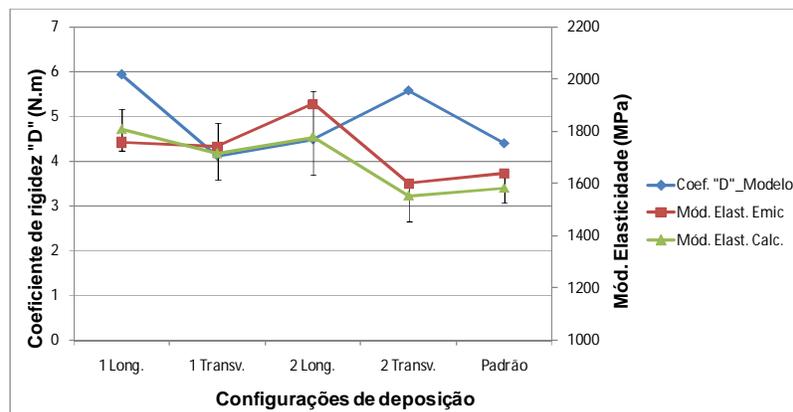


Figura 14. Comparação entre os módulos obtidos pelo software da máquina de ensaio e o módulo calculado a partir de pontos da zona elástica e o coeficiente de rigidez flexional “D” previsto da TCL.

6. CONCLUSÕES

Utilizando-se a deposição das camadas em configurações sanduíche para peças FDM, em todas as configurações estudadas, obtêm-se peças com características semelhantes ou com maior rigidez, nas duas direções principais do material, em relação às configurações padrões de deposição do processo, ou seja, camadas ortogonais sucessivas. Dessa forma, este tipo de configuração de construção pode ser utilizado para obtenção de protótipos ou peças finais mais resistentes, possibilitando assim que times de desenvolvimento de produto possam maximizar os ganhos com a utilização desta tecnologia.

Peças FDM construídas em configurações sanduíche não seguiram uma tendência nos resultados esperados de simulações realizadas utilizando a TCL. De acordo com a metodologia utilizada neste trabalho, observou-se que o modelo analítico utilizado não previu perfeitamente o comportamento das configurações, apesar de peças mais rígidas terem sido obtidas, como era o previsto, ocorreram discrepâncias.

É importante ressaltar que a TCL não prevê a existência de vazios estruturais. As peças produzidas em FDM apresentam vazios e a geometria dos mesmos muda conforme a configuração da deposição.

Vários parâmetros de processo podem influenciar o comportamento mecânico de peças FDM, porém concluiu-se que a utilização de ângulos de deposição com defasagens diferentes de 90° em conjunto com configurações sanduíche fornecem ganhos consideráveis na resistência da peça final. Em tese, estes ganhos podem estar relacionados com a mesoestrutura obtida, onde os vazios estruturais foram minimizados.

7. AGRADECIMENTOS

Ao laboratório de polímeros da Universidade de Caxias do Sul; Á FAPEAM pela concessão de bolsa de pesquisa; Aos estagiários do NUFER pela ajuda com o RP³ e na construção dos corpos-de-prova.

8. REFERÊNCIAS

- ABNT, 1982, “Plásticos – atmosfera padrão para condicionamento e ensaio”, NBR 7452, 5p.
- Agarwal, B.D and Broutman, L. J. 1990, “Analysis and performance of fiber composites”. John Wiley and Sons, Nova York, 2nd ed.
- Agarwala, M. K., Jamalabad, V. R., Langrana, N. A., Safari, A., Whalen, P. J. and Danforth S. C. 1996, “Structural quality of parts processed by fused deposition”. Rapid Prototyping Journal. Vol. 2, No. 4, pp. 4 – 19.
- Anh, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P. K. 2002, “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS”. Rapid Prototyping Journal. Vol. 7, No. 4, pp. 248 – 257.
- ASTM, 1998, “Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials”. ASTM D3039-95a Standard, Vol. 15.03, pp. 99-109.
- ASTM, 1990, “Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastic and electrical insulating materials”. ASTM D790 Standard.
- Bellini, A. and Güçeri, S. 2003, “Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling”. Rapid Prototyping Journal. Vol. 9, No. 4, pp. 252 – 264.
- Carvalho, J. e Volpato, N. 2007, “Prototipagem Rápida como processo de fabricação”, In Prototipagem Rápida – Tecnologias e aplicações, Volpato N. (editor). Ed. Blücher, São Paulo, 1ª edição, 2007.
- Chua, C.K., Leong, K.F. and Lim, C.S., 2003, “Rapid Prototyping, Principles and Applications”. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2nd ed.
- Jones, R.M. 1975, “Mechanics of Composite Materials”, McGraw-Hill, Nova York.
- Kulkarni, P. and Dutta, D. 1999, “Deposition strategies and resulting part stiffness in layered manufacturing”. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, pp. 93 – 103.
- Li, L., Sun, Q., Bellehumeur, C. and Gu, P. 2002, “Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties”. Journal of Manufacturing Process. Vol. 4, N° 2,.
- Rodriguez, J. F., Thomas, J. P. and Renaud, J. E. 2000, “Characterization of the mesostructure of fused - deposition acrylonitrile – butadiene – styrene materials”. Rapid Prototyping Journal. Vol. 6, No. 3, pp. 175 – 185.
- Rodriguez, J. F., Thomas, J. P. and Renaud, J. E. 2001, “Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials”. Experimental investigation. Rapid Prototyping Journal. Vol. 7, No. 3, pp. 148 – 158.
- Van Boggelen, D. R. 2006, “Failure Analyses of fiber reinforced laminated composite materials, using analytical and FEM technics”, Trabalho de conclusão de curso, Hanze University Groningen, Department of Mechanical Engineering.
- Volpato, N. 2007, “Os principais processos de prototipagem rápida”, In Prototipagem Rápida – Tecnologias e aplicações, Volpato N. (editor). Ed. Blücher, São Paulo, 1ª edição, 2007.
- Volpato, N., Manczak, T., Oliveira, J. H. S. A., Menezes, R. M. e Bonacin, M. V. 2006, “Avanços em um aplicativo para o planejamento de processo de prototipagem rápida”. IV Congresso de Engenharia Mecânica, (CD-ROM).

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

THE INFLUENCE OF BUILD PARAMETERS ON MECHANICAL BEHAVIOR OF PARTS MADE BY FUSED DEPOSITION MODELING

Laurence Colares Magalhães, lcmenge@yahoo.com.br

Neri Volpato, nvolpato@utfpr.edu.br

Marco Antônio Luersen, luersen@utfpr.edu.br

Federal University of Technology - Paraná, PPGEM/DAMEC, Av. Sete de Setembro, 3165, Curitiba - PR, 80230-901

Abstract. *To obtain parts from Rapid prototyping (RP) technologies is a very important step to new products development. In some cases these prototypes present poorer mechanical behavior than final products, which prevents designers to obtain maximum information from the prototypes. Particularly, in the Fused Deposition Modeling (FDM) technology, which works with ABS filaments, the prototype mechanical properties are influenced by filaments deposition orientation. The main goal of this work is to analyze the building material deposition strategies influence on mechanical properties of parts obtained by FDM. Some samples were built changing the filaments orientation over the layers. Mechanical tests were performed to verify the parts final stiffness. The Classical Lamination Theory was used to simulate the parts mechanical behavior in different deposition orientation. Some differences between TCL predictions and tests results were observed, but parts structurally stronger were built when compared to parts obtained by standard FDM deposition strategy.*

Keywords: *rapid prototyping, FDM, mechanical behavior, classical lamination theory.*