

Estudo numérico comparativo do emprego de materiais alternativos na construção de uma cadeira de rodas

Fábio de Paiva Cota ⁽¹⁾

Denison Baldo ⁽²⁾

Túlio Hallak Panzera ⁽³⁾

André Luis Christoforo ⁽⁴⁾

Resumo

As dificuldades encontradas pelos portadores de deficiência física que necessitam do uso de cadeira de rodas para se locomover são enormes. As cadeiras de rodas são usualmente fabricadas com materiais metálicos, o que torna um problema para o paciente devido às dificuldades de manuseio ocasionado pelo elevado peso. Este trabalho objetiva avaliar o desempenho mecânico do emprego de materiais alternativos de alta resistência e baixa densidade, tais como o alumínio e os compósitos laminados em fibras de vidro e carbono, no projeto de uma cadeira de rodas fabricada usualmente com o material aço carbono, permitindo-se avaliar a eficiência mecânica de ambos. Esta análise é essencialmente numérica, desenvolvida nos fundamentos do Método dos Elementos Finitos. Os resultados das simulações revelam maior relação resistência-densidade para os materiais compósitos, mostrando-se como alternativas eficientes a serem empregados no projeto de cadeiras de rodas.

Palavras-chave: materiais compósitos, elementos finitos, desempenho mecânico, cadeira de rodas.

¹ Mestrando em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, UFSJ, E-mail: fpcota87@hotmail.com

² Mestrando em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, UFSJ, E-mail: denison_db@yahoo.com.br

³ Engenheiro Mecânico, Dr. em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, UFSJ, E-mail: panzera@ufsj.edu.br

⁴ Engenheiro Civil, Dr. em Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, UFSJ, E-mail: alchristoforo@ufsj.edu.br

Abstract

The difficulties encountered by physically disabled people who require the use of a wheelchair to get around are enormous. The wheelchairs are usually made of metallic materials, which make it a problem to the patient due to handling difficulties caused by the high weight. This study evaluates the mechanical performance of a commercial wheelchair based on the use of alternative materials of high strength and low density, aluminum and laminated composites such as fiberglass and carbon numerical analysis was performed using the fundamentals of Finite Element Method. The simulation results showed a higher specific strength for composite materials, being an efficient alternative to replace steel on the design of wheelchairs.

Keywords: *composite materials, finite elements, mechanical performance, wheelchair.*

Introdução

Desde sua invenção, segundo historiadores no século XVI, a cadeira de rodas é um dos meios de locomoção mais práticos para pessoas portadoras de deficiência física, permitindo além da mobilidade, a maior interação destes indivíduos com a sociedade.

Contudo, na busca pela redução de custos os fabricantes de cadeira de rodas procuram utilizar materiais e processos de fabricação mais baratos, não dando tanta ênfase ao conforto, ergonomia, durabilidade e estabilidade, gerando um produto de qualidade questionável. Além disso, um grande problema causado pelo uso de materiais de baixo valor consiste no elevado peso do produto, tornando-o mais difícil de ser manuseado e exigindo um maior esforço para locomoção.

Neste contexto, o emprego de materiais alternativos na construção das peças componentes de cadeiras de rodas tem sido o foco de várias pesquisas, com o intuito de solucionar os problemas gerados principalmente pelo elevado peso (KALYANASUNDARAM, 2006).

Este trabalho objetiva avaliar o desempenho mecânico do emprego do alumínio e compósitos laminados em fibras de vidro e de carbono no projeto de uma cadeira de rodas, fabricada tipicamente com o material aço SAE 1020. Esta análise é essencialmente numérica, desenvolvida nos fundamentos do Método dos Elementos Finitos. Os resultados entre tensões

e deformações encontrados das simulações para ambos os materiais, incluindo o aço, permitem avaliar a eficiência mecânica de ambos.

Materiais e componentes estruturais da cadeira de rodas

A seleção da cadeira de rodas utilizada para realização da simulação numérica deste trabalho foi baseada em um modelo comercial, tratando-se de um sistema locomotor de elevado peso e de difícil manuseio (Figura 1.a), originalmente fabricada com aço SAE 1020.

A partir das dimensões originais retiradas desta cadeira de rodas, foi-se desenvolvido um modelo em CAD (Figura 1.b) a fim de submetê-lo a simulações numéricas. Diferentes materiais foram utilizados com o propósito de se avaliar a eficiência mecânica apresentada por ambos.



Figura 1. (a) Cadeira de referência para o modelo, (b) Modelo CAD gerado em 3D.

Para verificar o comportamento mecânico da estrutura da cadeira de rodas, dividiu-se o modelo CAD em três componentes estruturais: lateral (a), haste (b) e tesoura (c), assim como ilustrado na Figura 2.

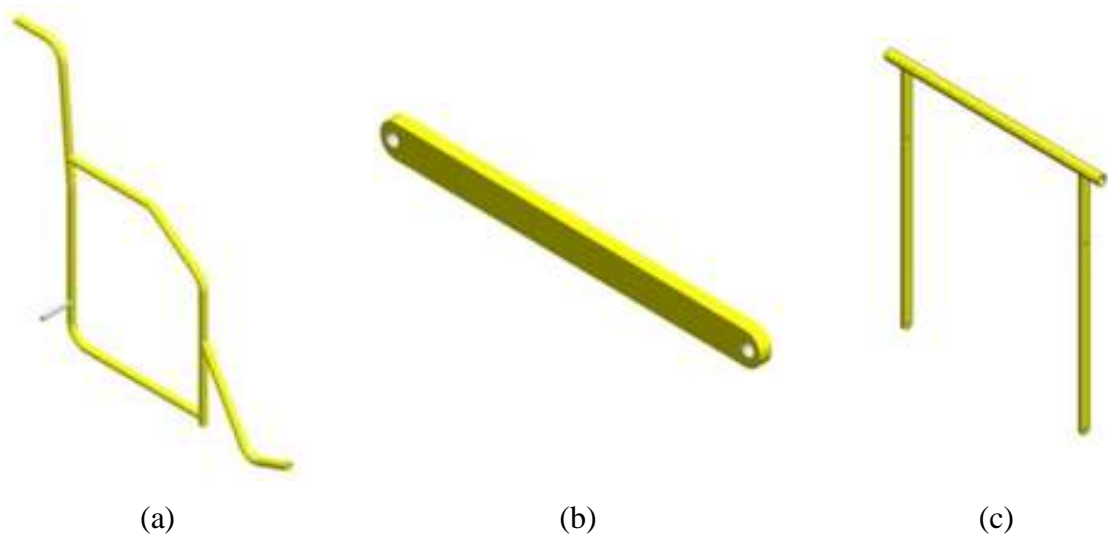


Figura 2. Componentes estruturais da cadeira de rodas. a) Lateral; b) Haste; c) Tesoura.

O carregamento estimado nas simulações foi baseado na massa de uma pessoa de 80 kg, ou seja, 800 N (KALYANASUNDARAM, 2006), um valor que abrange o peso dos possíveis usuários, incluindo ainda um fator de segurança igual a 3,125 (segurança de projeto), superior aos valores usuais utilizados em projetos mecânicos, variando de 1,3 a 2,0 (MOHAMMADI, 2010), conduzindo a um carregamento de projeto de intensidade 2500 N. O diagrama de corpo livre do sistema para esta condição foi construído para obter as forças atuantes em cada componente da cadeira de rodas. A partir destes resultados, a simulação estrutural foi realizada em cada uma das 3 peças separadamente. A montagem da estrutura da cadeira de rodas está detalhada na Figura 3, onde são utilizadas 2 laterais, 2 tesouras e 4 hastes.



Figura 3. Montagem da estrutura.

A Figura 4 representa o diagrama de corpo livre utilizado na definição das forças aplicadas em cada componente. A força de 625N foi determinada dividindo-se a carga total (2500 N) pelos 4 pontos de apoio da tesoura. No plano, aplicando-se as equações de equilíbrio da estática para corpos extensos determinam-se as reações nos vínculos das barras, assim como também apresentado na Figura 4.

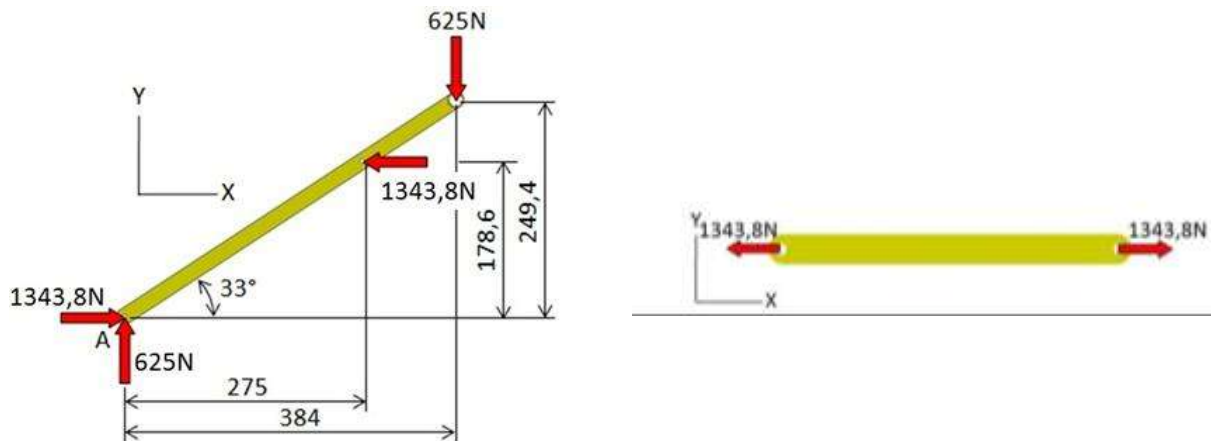


Figura 4. Diagrama de corpo livre das peças: Tesoura e Haste.

Neste trabalho foram realizadas apenas simulações nos três principais componentes estruturais apresentados. Os demais, como rodas e assento não foram analisados.

Com relação aos materiais, foram utilizadas duas classes distintas para as simulações, metais e materiais compósitos laminados, assim como apresentados na Tabela 1. Os materiais compósitos exibem alto módulo de elasticidade longitudinal e elevada resistência à tração, além do baixo peso específico, tornando-se uma opção promissora na substituição de peças e componentes fabricados em aço e/ou alumínio.

Tabela 1. Propriedades dos materiais utilizados para as simulações (DANIEL e ISHAI, 2006).

Material	Densidade [g/cm³]	Módulo de Elasticidade Longitudinal [GPa]	Limite de Escoamento/Ruptura [MPa]	Coefficiente de Poisson
Aço SAE 1020	7,85	207	210	0,30
Alumínio	2,70	70	70	0,15
Fibra de carbono	1,78	Direção 1 e 2: 142 Direção 3: 10,3	Longitudinal: 2280 Transversal: 57	Longitudinal: 0,27 Transversal: 0,07
Fibra de vidro	2,1	Longitudinal: 39 Transversal: 8,6	Longitudinal: 1080 Transversal: 39	Longitudinal: 0,28 Transversal: 0,06

Cabe ressaltar da Tabela 1 que as direções 1 e 2 dos compósitos são definidas no plano do tecido, sendo a terceira definida na espessura. O termo longitudinal faz referência a solicitação na direção axial das fibras e o termo transversal no plano ou na trama do tecido entrelaçado.

Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) mostra-se como uma excelente ferramenta de cálculo utilizada para analisar o comportamento dos materiais empregados em projetos estruturais, assim como o de avaliar o desempenho mecânico dessas estruturas.

Historicamente, o MEF surgiu em 1955, como evolução da análise matricial de modelos reticulados, motivado pelo advento do computador e elaborado com o intuito de se projetar estruturas de modelos contínuos.

O MEF pode ser considerado como uma técnica de gerar funções de aproximação, que podem ser utilizadas para interpolar deslocamentos, esforços, tensões e deformações ao longo do domínio do elemento.

Para a resolução aproximada de problemas estruturais segundo o MEF, as funções de forma podem ser aplicadas diretamente à sua equação diferencial (Resíduos Ponderados) ou a princípios energéticos, tais como o Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV).

O deslocamento em problemas estruturais elásticos é tido como incógnita fundamental, obtido por intermédio da resolução de um sistema de equações lineares, assim como expressa a equação 1, sendo que a sua construção fica em função da disposição da malha, e conseqüentemente, dos nós dos elementos finitos na estrutura, como pode ser visto na Figura 5.

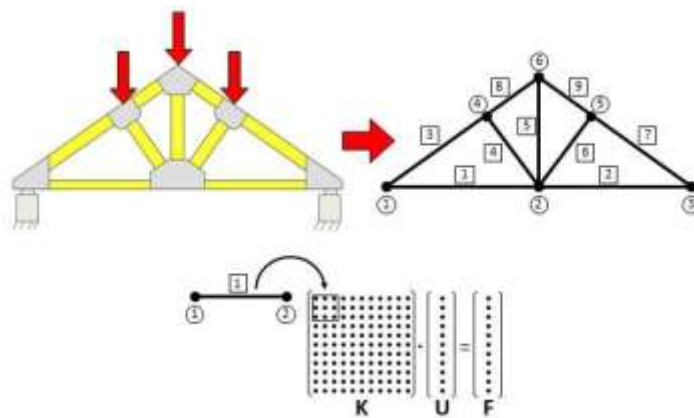


Figura 5. Exemplo de discretização de uma malha de elementos finitos em uma treliça.

$$[K]\{U\}=\{F\} \quad (1)$$

Em que:

[K] - matriz de rigidez da estrutura;

{U} - vetor dos deslocamentos nodais da estrutura;

{F} - vetor das forças equivalentes nodais da estrutura.

Neste trabalho, a verificação do desempenho mecânico dos materiais aqui utilizados (fibra de carbono, fibra de vidro e alumínio) assim como dos materiais usualmente empregados (aço) no desenvolvimento de uma cadeira de rodas comercial foi desenvolvido nos fundamentos do MEF. O elemento finito utilizado em todas as simulações é do tipo casca, contendo 6 nós e 6 graus de liberdade por nó, assim como ilustra a Figura 6.

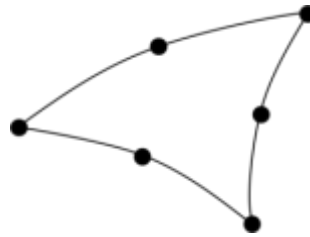


Figura 6. Elemento finito tipo casca.

Com relação ao emprego do MEF na avaliação do desempenho mecânico de estruturas e na determinação de propriedades elásticas de materiais, alguns trabalhos (CHRISTOFORO, 2007; BRAESS, 2007; GÓES, 2004; KAOUA, 2008; LOPES, 2010; YAO e BAI, 2009).

Simulação do desempenho mecânico dos materiais

Os resultados das simulações numéricas em termos das tensões e deformações atuantes nos elementos componentes da cadeira de rodas são apresentados nesta seção para ambos os materiais em estudo, sendo estas calculadas com uso do software COSMOS®.

Tensões nas peças componentes da cadeira de rodas

A Figura 7 apresenta as componentes de tensão normal na lateral da cadeira fabricada com o aço 1020. Em geral a cadeira apresentou tensões inferiores ao limite de escoamento, entretanto, a tensão máxima nessa estrutura ocorreu significativamente em duas regiões de concentração de tensões (ver Figura 8), sendo este comportamento apresentado para todos os materiais avaliados, visto a tensão ser uma variável associada à geometria, e não ao material que constitui a estrutura.

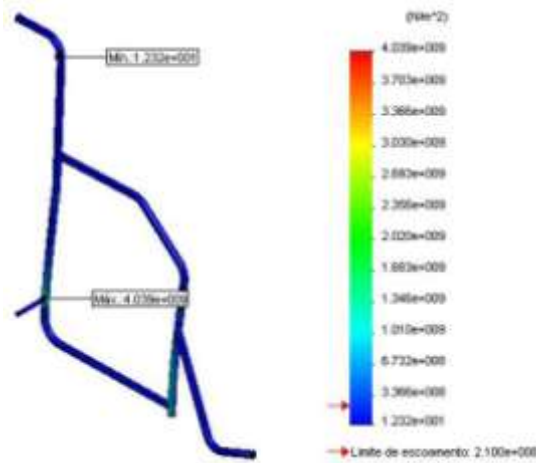


Figura 7. Simulações de tensão no componente lateral para aço 1020.

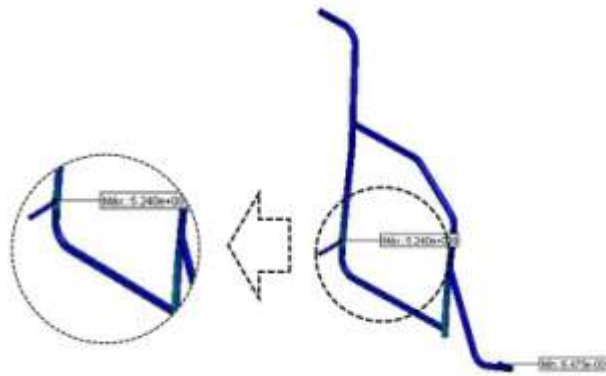


Figura 8 - Região de concentração de maior tensão.

A Figura 9 apresenta um gráfico comparativo da tensão máxima juntamente com os valores limites (ver Tabela 1) para ambos os materiais.

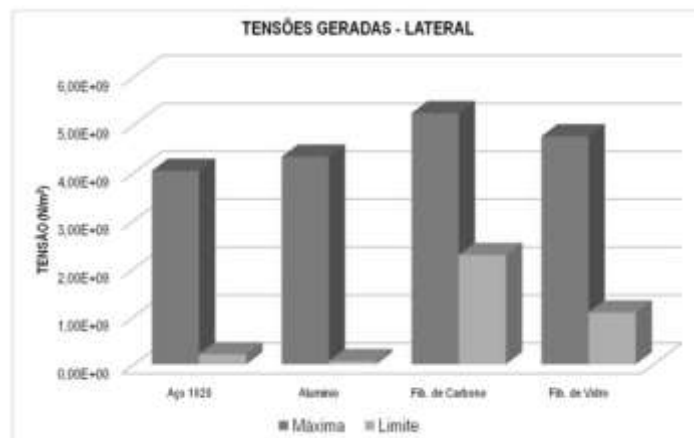


Figura 9. Gráfico comparativo das tensões geradas no componente lateral.

Nota-se que os valores das tensões limite foram excedidos em todos os materiais devido à região de concentração de tensões. Porém é possível observar que os materiais compósitos apresentam um comportamento mecânico superior aos materiais metálicos ensaiados. Ainda sim, o problema da concentração de tensões neste componente pode ser facilmente contornado com o emprego de chapas reforçadoras nestas regiões, permitindo maior distribuição das tensões sem provocar grandes alterações de peso e funcionalidade da peça. Cabe ressaltar que a cadeira de rodas contempla a inserção de chapas reforçadoras, entretanto, estas não foram utilizadas nas simulações visto a necessidade de estudos específicos para a sua inclusão em materiais compósitos. A disparidade entre os valores encontrados entre tensões atuantes e o limite de resistência seguramente pode ser reduzida diminuindo-se o fator de segurança utilizado, visto este ser duas vezes superior ao menor dentre os usuais.

A Figura 10 exibe os resultados em termos das tensões obtidas da simulação da haste fabricada em aço 1020. Observa-se pela geometria que este componente apresenta tensões bem menores que as tensões limite do material. A máxima tensão determinada foi de aproximadamente $6,1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.



Figura 10. Simulação de tensão no componente haste para aço 1020.

O gráfico da Figura 11 apresenta as tensões máximas geradas na haste para cada material juntamente com os valores limites para os mesmos.



Figura 11. Gráfico comparativo das tensões geradas no componente haste.

Para todos os materiais, a tensão limite foi superior as extremas calculadas. Cabe ressaltar o alto desempenho dos materiais compósitos, principalmente aqueles fabricados com fibra de carbono, que exibiram uma tensão máxima de $6,27 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ enquanto o mesmo apresenta um valor limite de $1,90 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$.

Embora o alumínio apresente uma tensão limite superior próxima as extremas calculadas, ocorrendo na região do pino de encaixe, resultando em um concentrador de tensões, observa-se nas regiões próximas ao furo que as tensões encontradas são bem inferiores as limites deste material.

A Figura 12 ilustra o estado de tensão na tesoura para o aço 1020. A tensão de limite para este componente é extrapolada em pequenas regiões, porém, a maior parte da peça exhibe tensões inferiores a limite do material. Ressalta-se que o coeficiente de segurança utilizado é duas vezes maior que menor dentre os usuais. A sua redução acarretaria em tensões atuantes inferiores às limites também para os materiais aço 1020 e alumínio.

COTA, F. P. et. al. Estudo numérico comparativo do emprego de materiais alternativos na construção de uma cadeira de rodas.

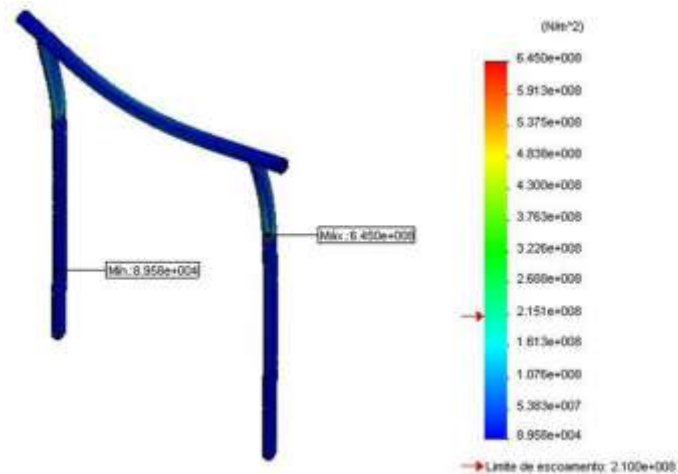


Figura 12. Simulações de tensão no componente tesoura para aço 1020.

A Figura 13 apresenta o gráfico comparativo entre tensões máximas atuantes e as limites para cada material constituinte da tesoura.

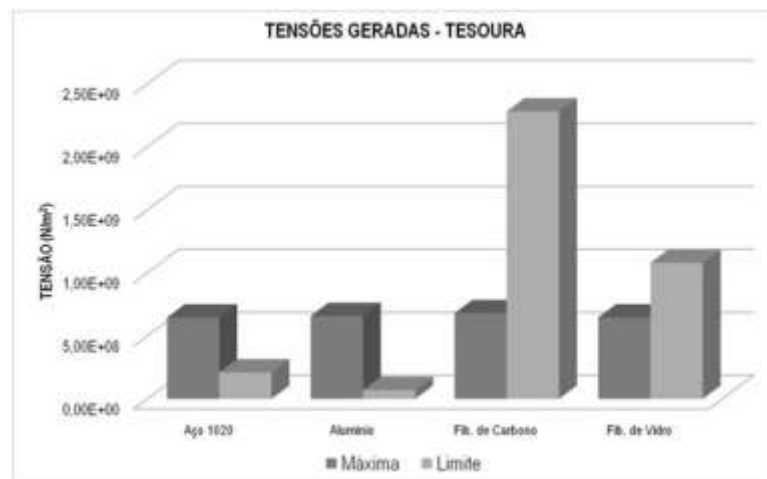


Figura 13. Gráfico comparativo das tensões geradas no componente tesoura.

Verifica-se na Figura 13 que as tensões máximas atuantes ultrapassam os valores limites para os materiais aço e alumínio. Os materiais compósitos de fibra de carbono e de fibra de vidro exibiram tensões limites superiores as tensões máximas calculadas. Verifica-se ainda a grande segurança de projeto alcançada neste componente constituído do material laminado com fibra de carbono, visto a tensão limite ser 335% maior que a máxima tensão atuante na peça.

Deformações nas peças componentes da cadeira de rodas

A Figura 14 exibe as deformações na componente haste para o material aço 1020, expressas em *mm*. Pode-se observar que a maior deformação ocorre na região de encaixe do pino, o que significa uma região de maior esforço. A deformação avaliada nessa região é de aproximadamente $2,54 \cdot 10^{-4}$ mm/mm.



Figura 14. Deformação do componente haste para aço 1020.

O gráfico da Figura 15 ilustra a deformação máxima do componente haste para cada material. O compósito fabricado com fibras de vidro apresentou a maior deformação, de aproximadamente $1,33 \cdot 10^{-3}$ mm/mm. O material de melhor desempenho foi o aço 1020, exibindo uma deformação máxima de $2,55 \cdot 10^{-4}$ mm/mm, seguida da fibra de carbono com uma deformação de $3,45 \cdot 10^{-4}$ mm/mm.

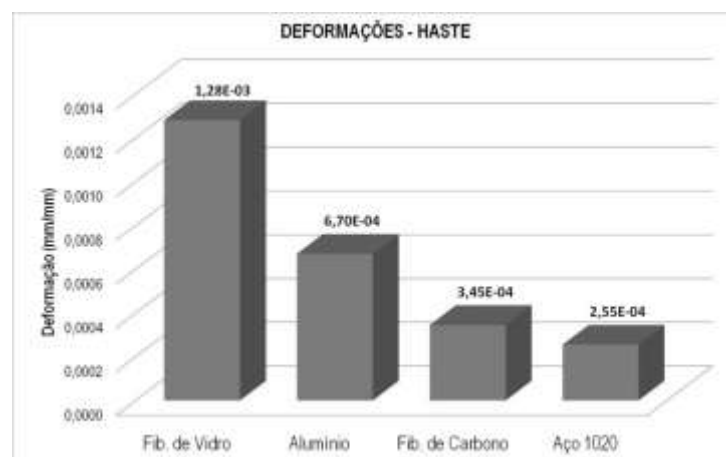


Figura 15. Deformações relativas do componente haste.

A Figura 16 apresenta o estado de deformações do componente tesoura utilizando as propriedades do aço 1020. O valor da deformação máxima no material foi de $2,7 \cdot 10^{-3}$ mm/mm. Para todos os materiais a estrutura teve os seus pontos de máxima deformação nas mesmas regiões.

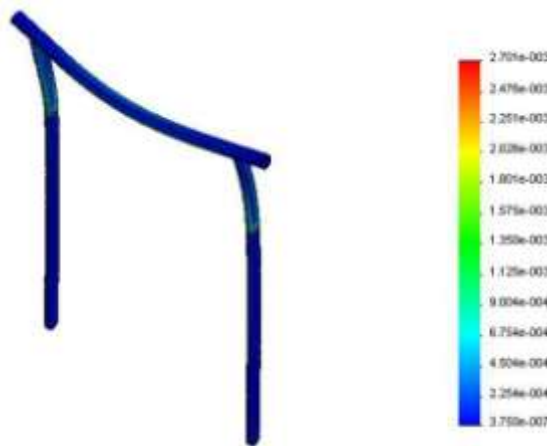


Figura 16. Deformação do componente tesoura para aço 1020.

A Figura 17 apresenta a deformação máxima para cada material do componente tesoura. O compósito laminado com fibra de vidro exibiu a maior deformação ($1,73 \cdot 10^{-3}$ mm/mm), e o aço 1020 a menor deformação, sendo igual $2,70 \cdot 10^{-3}$ mm/mm.

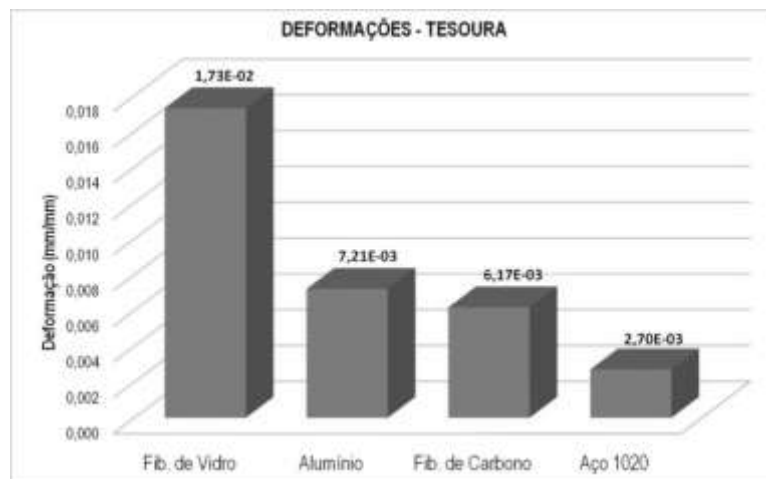


Figura 17. Deformações relativas do componente tesoura.

A Figura 18 exibe a distribuição das deformação para a lateral da cadeira de rodas fabricada em aço 1020. Observa-se um valor máximo de $1,691 \cdot 10^{-2}$ mm/mm, ocorrido nas respectivas regiões de concentração de tensões, ou seja em pequenos pontos ao longo da peça.

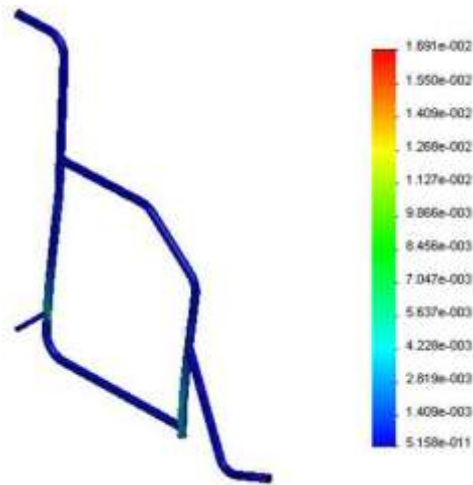


Figura 18. Deformação do componente lateral feita com aço 1020.

O gráfico comparativo da Figura 19 apresenta a deformação no componente lateral para cada material. Da mesma forma, a fibra de vidro obteve maior deformação, destacando a baixa deformação para os compósitos de fibra de carbono ($5,40 \cdot 10^{-2}$ mm/mm).

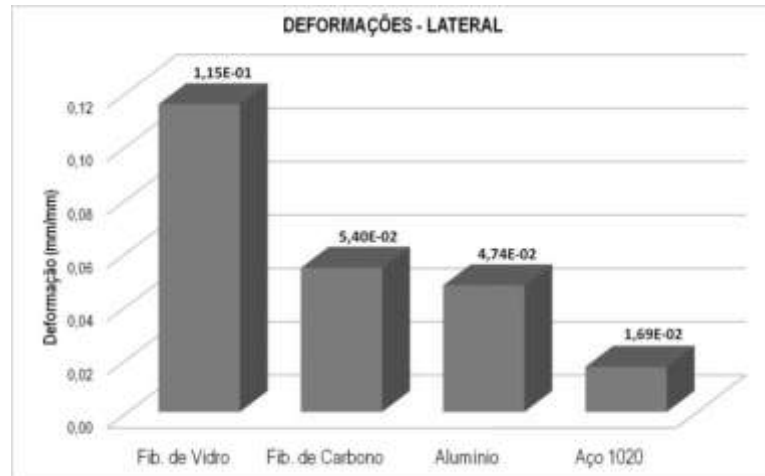


Figura 19. Gráfico comparativo das deformações relativas do componente lateral.

Após a análise de deformação das duas classes de materiais, verificou-se que a fibra de carbono exibiu um comportamento similar aos materiais metálicos, além da sua baixa densidade volumétrica.

Massa total das peças componentes

A partir do volume das três peças componentes da cadeira de rodas e das respectivas densidades de cada material analisado, calculam-se as massas totais do conjunto, assim como ilustrado na Figura 20.

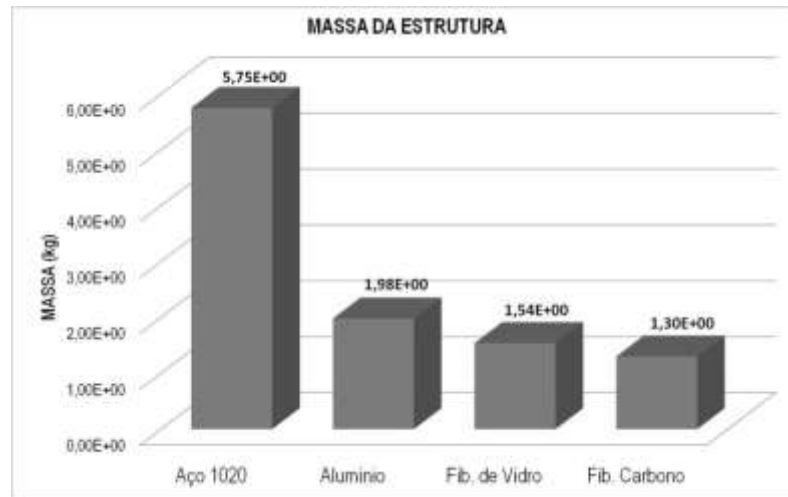


Figura 20. Gráfico comparativo de massa da cadeira de rodas para diferentes materiais.

A massa total das peças componentes para a fibra de carbono é a menor dentre os materiais analisados, sendo 1,30 kg. Ainda da Figura 20, constata-se que a cadeira de rodas projetada com o aço 1020 apresentou maior massa, de 5,75kg, aproximadamente 4,4 vezes superior a massa das componentes da cadeira com fibras de carbono.

Redimensionamento das peças componentes da cadeira de rodas

Pelo maior desempenho mecânico apresentado pelas fibras de carbono aliada a menor massa, procurou-se minorar as dimensões originais (utilizadas nas simulações anteriores) das seções transversais dos elementos componentes a fim de reduzir a massa do conjunto.

A partir de novas simulações foi possível obter uma redução de 70% da espessura da haste. A Figura 21 exhibe o estado de tensões na barra para as novas dimensões, mostrando que as tensões extremas calculadas não ultrapassam o valor limite para a fibra de carbono.

COTA, F. P. et. al. Estudo numérico comparativo do emprego de materiais alternativos na construção de uma cadeira de rodas.

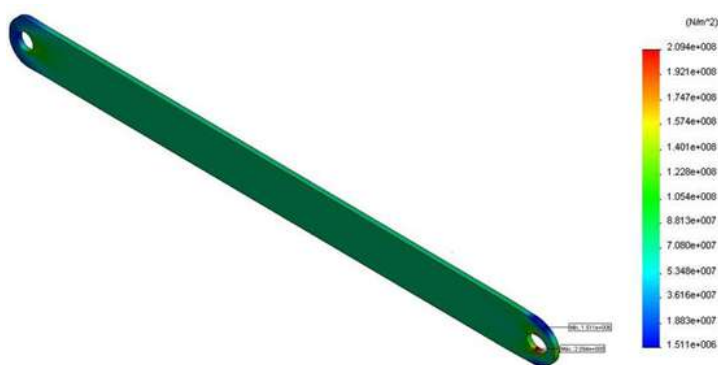


Figura 21. Tensões na haste para as novas medidas.

A Figura 22 exibe o comportamento mecânico do componente tesoura para as novas medidas, alcançando uma redução de 50% nos diâmetros dos tubos, logo, um aumento da tensão máxima de $1,08 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ para $6,80 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$. Apesar do aumento considerável, as tensões máximas atuantes foram inferiores à limite da fibra de carbono.

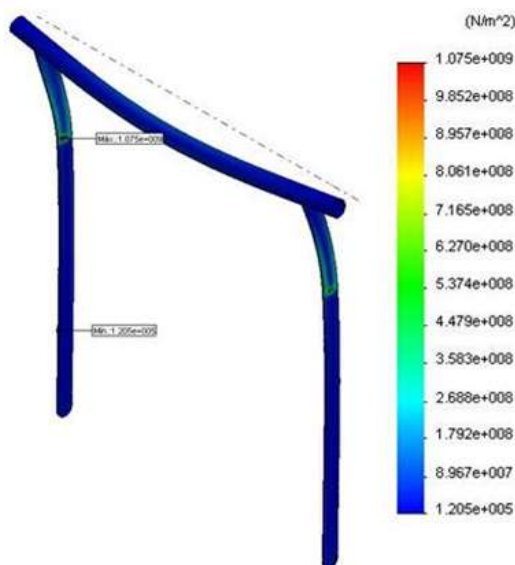


Figura 22. Tensão no componente tesoura para as novas medidas.

Para a lateral da cadeira foi possível reduzir o diâmetro do tubo em até 40%, observando, assim como em algumas simulações anteriores, a extrapolação da tensão limite do material em regiões de concentração de tensões (Figura 23).

COTA, F. P. et. al. Estudo numérico comparativo do emprego de materiais alternativos na construção de uma cadeira de rodas.

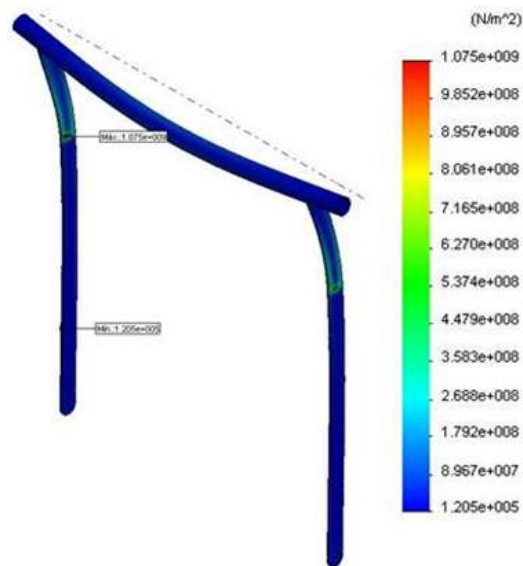


Figura 23. Tensão no componente lateral para as novas medidas.

As novas dimensionais dos componentes da cadeira de rodas proporcionaram uma redução percentual de 30% em massa da estrutura em relação ao projeto original de fibra de carbono, e aproximadamente 85% se comparada com a estrutura original fabricada em aço, assim como ilustrado na Figura 24.

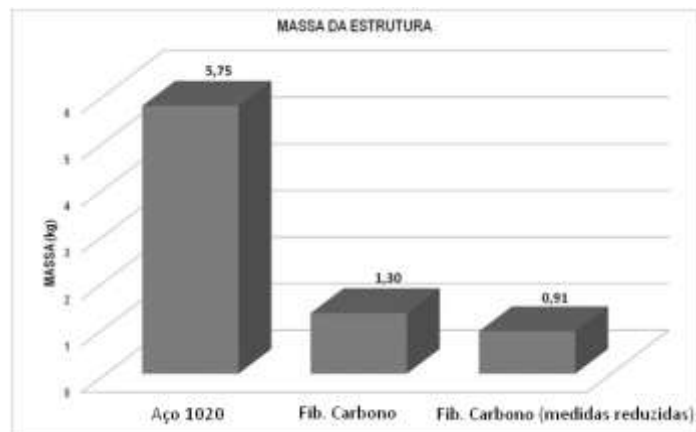


Figura 24. Comparativo de massa entre a estrutura original e a estrutura otimizada.

Conclusões

O trabalho apresentou uma análise do desempenho mecânico para uma cadeira de rodas constituída por materiais alternativos. É de grande importância destacar que a viabilidade

econômica do uso de cada material não foi levada em consideração, podendo ser abordada no desenvolvimento de novas pesquisas.

i - Quando comparado as tensões geradas nos componentes mecânicos das peças constituintes da cadeira de rodas, os compósitos em geral mostraram-se superiores aos materiais metálicos, exibindo a fibra de carbono o melhor desempenho mecânico dentre os demais.

ii - Além do melhor desempenho mecânico, assim como esperado, a cadeira de rodas apresentou menor massa com a fibra de carbono, sendo a constituída de aço 1020 a de maior massa. O desempenho mecânico da fibra de carbono associada à menor das massas dentre os materiais utilizados permitiram um novo estudo, visando à redução das medidas dos componentes estruturais, implicando em uma maior redução de massa. As novas medidas para as peças foram determinadas por intermédio de uma série de simulações numéricas, objetivando-se as menores medidas para os componentes com a garantia da estrutura resistir de forma satisfatória e com segurança (minoração das tensões dos materiais) as tensões atuantes, provenientes do conjunto de forças idealizado (majoração do carregamento).

iii - A geometria dos componentes da cadeira de rodas assim como dos dispositivos de conexão entre as peças propiciaram em pequenas regiões a existência de concentradores de tensões. Cabe ressaltar, como comentado anteriormente, que possíveis soluções a esta problemática constituem no emprego de chapas assim como de geometrias mais suaves na transição de uma barra com as demais, evitando-se desta forma a existência de regiões angulosas, permitindo uma distribuição mais uniforme para o campo das tensões, podendo ser estudada em trabalhos futuros.

iv - as deformações nos componentes simulados com o uso do aço 1020 exibiram as menores deformações, por ser este o material de maior módulo de elasticidade dentre os demais.

De forma geral, o emprego da análise numérica mostrou-se como boa metodologia de cálculo no estudo das peças componentes da cadeira de rodas, permitindo com grande precisão a análise das tensões e deformações, possibilitando o estudo de novas pesquisas envolvendo novas geometrias e materiais, visando a melhoria das condições de mobilidade dos cadeirantes.

Referências bibliográficas

BRAESS, D., KALTENBACHER, M., Efficient 3D-finite element formulation for thin mechanical and piezoelectric structures. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, 2008, No. 73, 147-161.

CALLISTER Jr, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. USA: John Wiley & Sons, 2002.

CHRISTOFORO, A. L, **Influência das irregularidades da forma em peças de madeira na determinação do módulo de elasticidade longitudinal**, Tese de Doutorado, EESC – USP, 2007.

DANIEL, I. M., ISHAI, O. **Engineering mechanics of composites materials**. New York: Oxford University Press, 2006.

GÓES, J. L. N.. **Modelos teóricos para o dimensionamento de pontes com tabuleiro multicelular de madeira protendida**. In: XXXI Jornadas Sud-americanas de Ingeniería Estructural. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. Anais, cd-rom, 2004.

KALYANASUNDARAM, S.; LOWE, A.; WATTERS, A. J. **Finite element analysis and optimization of composite wheelchair wheels**. *Composite Structures*, 2006, No. 75, 393-399.

KAOUA, S.; DAHMOUN, D.; BELHADJ, A.; AZZAZ, M. **Finite element simulation of mechanical behaviour of nickel-based metallic foam structures**. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, No 471, 147-152.

LOPES, P. A. M.; GOMES, H. M., AWRUCH, A. M. **Reliability analysis of laminated composite structures using finite elements and neural networks**. *Composite Structures*, 2010, No. 92, 1603-1613.

MOHAMMADI, M. **Stress concentration around a hole in a radially inhomogeneous plate**, *International Journal of Solids and Structures*, v.48, pp. 483–491, 2010.

YAO, Z.; BAI, G. **Finite Element Analysis on Mechanical Behaviors of a Steel-concrete Hybrid Structure**. In: International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, 2009, 114-117.