

**ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO
DA FORÇA TANGENCIAL EM CADEIRA DE RODAS COM TECNOLOGIA ASSISTIDA****FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR THE DEVELOPMENT OF A TANGENTIAL FORCE
MEASUREMENT SYSTEM IN TECHNOLOGY-ASSISTED WHEELCHAIRS****Luis Henrique Pereira de Almeida^{1 i}****Leandro Cardoso da Silva^{2 ii}****Nelis Evangelista Luiz^{3 iii}****Erick Toshio Yamamoto^{4 iv}****Ricardo Hovacker Baldaconi^{5 v}****Carlos César Pestana^{6 vi}****Antônio Carlos Lemos Carvalho^{7 vii}****Norberto Goncalves Neto^{8 viii}**

Data de submissão: (20/04/2022) Data de aprovação: (12/08/2022)

RESUMO

A locomoção com cadeira de rodas manuais, grande parte das vezes, provocam lesões e dores constantes nos membros superiores dos usuários devido às elevadas forças e pela repetição de movimentos da propulsão. Como solução desses problemas, a cadeira de rodas com propulsão assistida, portadora de motores elétricos que auxiliam o cadeirante durante a propulsão manual reduzindo a força necessária para a propagação, é uma nova modalidade de cadeira que vem sendo desenvolvida para reduzir esses impactos. Novas técnicas de controle e interação com o cadeirante podem melhorar o desempenho desta classe de cadeiras, tornando o dia a dia do usuário mais fácil. Sabendo disso, este trabalho propõe o projeto de um aro de propulsão de uma cadeira de rodas com tecnologia assistida, capaz de medir as forças tangenciais aplicadas pelo usuário para realimentação na malha de controle associada a estas estratégias. O componente principal do projeto é um eixo tubular instrumentado com extensômetros e que conecta o aro de propulsão à roda. O projeto 3D e as análises em elementos finitos para verificação de resistência, rigidez e sensibilidade dos

¹ Pós-graduando em Projetos de Mecânica Industrial na Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Simonsen”. e-mail: luis-henrique1979@hotmail.com

² Docente e Me. em Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia SENAI “Roberto Simonsen”. E-mail: leandro.cardoso@sp.senai.br

³ Docente e Doutor em Engenharia Metalúrgica da Faculdade SENAI de Tecnologia Industrial. E-mail: nelis.evangelista@sp.senai.br

⁴ Docente e MSc em Automação Industrial da Faculdade SENAI de Tecnologia Industrial. E-mail: erick.yamamoto@sp.senai.br

⁵ Docente e MSc em Tecnologia Nuclear da Faculdade SENAI de Tecnologia Industrial. E-mail: riardo.hovacker@sp.senai.br

⁶ Docente e Especialista em Projetos da Faculdade SENAI de Tecnologia Industrial. E-mail: carlos.pestana@sp.senai.br

⁷ Docente e MBA em Serviços em Engenharia de Comunicação de Dados da Faculdade SENAI de Tecnologia Industrial. E-mail: acarvalho@sp.senai.br

⁸ Docente e MSC em Engenharia da Informática da Faculdade SENAI de Tecnologia Industrial. E-mail: norberto.neto@sp.senai.br

Strain Gages foram realizadas utilizando o Solidworks. Os resultados obtidos satisfazem as premissas do projeto e mostram que a resistência e a rigidez estão adequadas frente às demandas mecânicas típicas durante a propulsão, sendo comprovado também por cálculos analíticos. Também foram obtidos resultados de microdeformações suficientes para os extensômetros detectarem em leitura.

Palavras-chave: cadeira de rodas; propulsão assistida; forças tangenciais; elementos finitos.

ABSTRACT

Most of the time, locomotion with manual wheelchairs causes injuries and constant pain in the users' upper limbs due to the high forces and the repetition of propulsion movements. As a solution to these problems, the wheelchair with assisted propulsion, with electric motors that help the wheelchair user during manual propulsion, reducing the force necessary for propagation, is a new type of wheelchair that has been developed to reduce these impacts. New control and interaction techniques with the wheelchair user can improve the performance of this class of chairs, making the user's day to day easier. Knowing this, this work proposes the design of a propulsion rim of a wheelchair with assisted technology, capable of measuring the tangential forces applied by the user for feedback in the control loop associated with these strategies. The main component of the project is a tubular shaft instrumented with strain gauges and which connects the propulsion rim to the wheel. The 3D design and finite element analysis to verify the strength, stiffness and sensitivity of Strain Gages were performed using Solidworks. The results obtained satisfy the project's assumptions and show that the strength and stiffness are adequate for the typical mechanical demands during propulsion, which is also confirmed by analytical calculations. Sufficient microstrain results were also obtained for the strain gauges to detect in reading.

Keywords: wheelchair; assisted propulsion; tangential forces; finite elements.

1 INTRODUÇÃO

O uso de cadeira de rodas para pessoas com deficiência motora pode melhorar a sua qualidade de vida pois proporciona mobilidade para as tarefas do dia a dia. Segundo dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 45 milhões de pessoas no Brasil possuem algum tipo de deficiência, e, dentre elas, cerca de 5 milhões de pessoas são usuárias de cadeira de rodas (Censo 2010). No entanto, embora seja usada por muitas pessoas, é considerada uma forma ineficiente de locomoção e leva a elevada incidência de lesões e dores nos membros superiores dos cadeirantes (ARVA *et al.*, 2001; WATERS & MULROY, 1999; WOUDE *et al.*, 2001; BONINGER *et al.*, 2002).

As cadeiras de rodas motorizadas reduzem os danos causados pelas cadeiras convencionais, mas não proporcionam o exercício dos membros superiores, que trazem diversos benefícios à saúde e são extremamente importantes. Sendo assim, são prescritas a pessoas que possuem um grau mais avançado de deficiência motora. Além disso, essas cadeiras são maiores e possuem maior massa que dificultam o transporte e limitam a mobilidade (LEVY *et al.*, 2004).

Para somar os benefícios à saúde proporcionados pela propulsão manual com a facilidade de locomoção da cadeira motorizada,

foi desenvolvida uma categoria de cadeira de rodas designada de *Pushrim-activated power assisted wheelchairs* (PAPAWs) e que será chamado neste trabalho de cadeira de rodas manual com propulsão assistida de acordo com Guillon *et al.* (2015) e Kloosterman *et al.*, (2012), ou cadeira de rodas híbrida. Dessa forma, o cadeirante terá os benefícios cardiovasculares e musculoesqueléticos provenientes da propulsão manual e evitará as sobrecargas e possíveis lesões nos membros superiores. Estas cadeiras de rodas possuem motores que auxiliam o usuário, sem substituir a propulsão manual e grande parte das maneiras de controle do torque nas rodas necessita da determinação das forças tangenciais empregadas nos aros de propulsão.

Estudos mostram que esse tipo de cadeira auxilia a locomoção em terrenos acidentados ou em rampas e pavimentos com grama e carpete, reduzindo os esforços musculares dos membros superiores, pois possuem microcontroladores e motores elétricos que auxiliam no deslocamento. No entanto, a performance em ambientes pequenos foi inferior em comparação com as cadeiras tradicionais, gerando dificuldades para realizar manobras como curvas, wheelie, que é uma habilidade que o cadeirante deve desenvolver para poder ultrapassar obstáculos deixando as rodas dianteiras suspensas, e abertura de portas (GUILLON *et al.*, 2015; KLOOSTERMAN *et al.*, 2015).

A partir dos problemas indicados, percebe-se uma possibilidade de melhoria na programação do controle e na interação com o usuário.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma maneira de medir a força tangencial no aro de uma cadeira de rodas que será adaptada com motores elétricos e um sistema de controle para reduzir a força necessária para a propagação. Para isso, foi proposta uma forma de fixação através de um eixo tubular que será instrumentado com strain gages e que irá conectar o aro à roda da cadeira, e permitirá a medição do torque aplicado pelo cadeirante no aro através das microdeformações obtidas pelos extensômetros. O projeto foi desenvolvido utilizando o software Solidworks para o modelamento 3D e para a análise em elementos finitos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Os principais tipos de cadeiras de rodas são: cadeira de rodas com propulsão manual e motorizada. As cadeiras com propulsão manual trazem benefícios à saúde do usuário pois exigem atividades musculares nos membros superiores e apresentam um baixo custo, comparado às outras cadeiras. No entanto, a incidência de lesões nos punhos, cotovelos e ombros ficam entre 25% e 80% e, além disso, estudos indicam que essas dores aumentam com o tempo de uso da cadeira e a capacidade cardiopulmonar tende a diminuir com a idade, prejudicando ainda mais a mobilidade (COOPER *et al.*, 2002).

A figura 1 mostra um exemplo convencional deste tipo de cadeira.

Figura 1 - Cadeira de rodas com propulsão manual



Fonte: Polifisio (2022)

As cadeiras motorizadas, são indicadas para pessoas que não podem conduzir uma cadeira de rodas manual, ou seja, são recomendadas para usuários com lesão na medula, tetraplégicos ou paralisia cerebral, pois são fáceis de conduzir. No entanto, esses tipos de cadeiras possuem desvantagens, como o seu peso e tamanho, e também não proporcionam benefícios à saúde, já que não é necessário esforço para se movimentar, e, devido a isso, pode agravar o sedentarismo e causar atrofia muscular nos membros superiores, e para o incentivo aos exercícios físicos, é necessário fisioterapia e acompanhamento médico constante, além de serem mais caras que as cadeiras convencionais. A figura 2 é um exemplo deste tipo de cadeira.

Figura 2 – Cadeira de rodas motorizada



Fonte: Ortoponto (2022)

Já as cadeiras híbridas, mostrada na figura 3, foram desenvolvidas para estimular a atividade física dos usuários e diminuir a possibilidade de lesões nos ombros, punhos e cotovelos, causadas pelo excesso de força e pelos movimentos repetitivos, mas ainda é de pouco acesso às pessoas, pois possui um custo ainda mais elevado.

Figura 3 – Cadeira de rodas com propulsão assistida

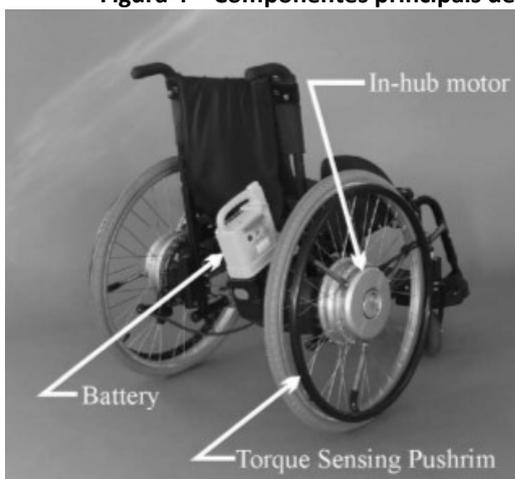


Fonte: Gmobility (2022)

2.1 Funcionamento da Cadeira de Rodas com Propulsão Assistida

A cadeira de rodas manual com propulsão assistida ou híbrida, possui como componentes uma bateria, dois aros com sensor de torque (“Torque Sensing Pushrim”), e normalmente dois motores elétricos incorporados aos cubos das rodas (“In-hub motor”), conforme figura 4.

Figura 4 – Componentes principais de uma cadeira de rodas de propulsão assistida



Fonte: Adaptado de (ALGOOD *et al.*, 2004)

Na cadeira mostrada na figura 4, o torque que é aplicado no aro de propulsão ativa a cadeira e faz com que os motores apliquem torque às rodas. Um conjunto de molas de compressão linear regula esta força e o deslocamento é registrado por um potenciômetro que

detecta o movimento relativo entre a força e o cubo, onde está localizado o motor elétrico. Os sinais do potenciômetro das rodas são conectados em um microcontrolador presente em um compartimento próximo à bateria. Esse microcontrolador possui um algoritmo que coordena o controle do motor de cada roda, que está conectado a uma transmissão presente dentro do cubo. Todo o sistema é alimentado por uma bateria, e as rodas possuem eixos que podem ser desmontados e adaptados em cadeiras manuais, com algum hardware personalizado (COOPER *et al.*, 2002).

Estudos mostram que esse tipo de cadeira de rodas aumenta significativamente a eficiência mecânica em aproximadamente 80%, quando comparadas às cadeiras de rodas tradicionais. Além disso, pessoas que utilizaram essas cadeiras reportaram mais facilidade para subir em rampas e para deslocamentos mais longos com velocidades mais elevadas, sem relatarem cansaço ou fadiga (ARVA *et al.*, 2001; FITZGERALD *et al.*, 2003).

3 PROJETO MECÂNICO

Para a mensurar a força tangencial, foram realizadas modificações entre o aro e a roda, para transformar em isostática a estrutura que inicialmente era hiperestática. A ideia foi conectar o aro por meio de um eixo tubular para transmitir os esforços aplicados à roda, conforme mostrado na figura 5.

Figura 5 – Montagem do aro na roda

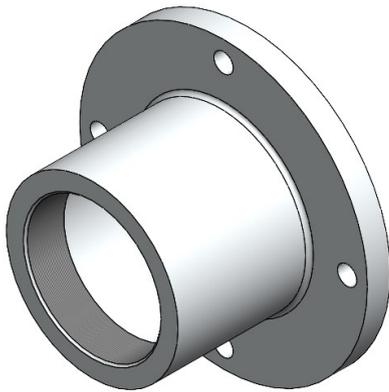


Fonte: Autor

Os extensômetros serão instalados no eixo do aro, e este é conectado à roda através de uma rosca. O diâmetro externo foi determinado por meio de simulações em elementos finitos e análises realizadas na seção 4. Dessa forma, pode-se medir o momento torçor que irá passar pela estrutura tubular e estimar a força tangencial aplicada no aro, já que o seu raio é conhecido e com as leituras dos strain gages pode-se determinar as tensões.

Para que os extensômetros possam medir deformações associadas ao momento torçor, foi necessário ajustar a espessura da parede para que possa ser atingido uma sensibilidade suficiente, de acordo com a análises e simulações. Além disso, foi necessário que o comprimento do eixo fosse o suficiente para que as medições não fossem afetadas pelos efeitos de borda, que são alterações de diâmetro ou mudança de geometria, conforme mostrado na figura 6.

Figura 6 – Eixo do aro

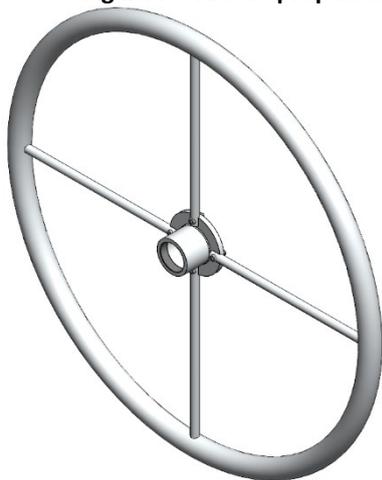


Fonte: Autor

Para apresentar boas propriedades mecânicas e ser leve para o fácil manuseio, foi selecionada a liga de alumínio 7075 T6, que além disso, apresenta excelente grau de polimento e brilho e boa usinabilidade. Devido a isso e por apresentar geometria simples, optou-se pela usinagem no lugar da manufatura aditiva para a fabricação.

Os aros de propulsão utilizados no desenvolvimento do projeto são de uma cadeira de rodas convencional, fabricado com geometria tubular de alumínio, com 22 polegadas de diâmetro. A montagem da estrutura se dá por meio de quatro barras de alumínio com diâmetro de 9 mm que irão suportar as forças tangencial e médio-lateral típicas e evitar grandes deslocamentos do aro, conforme dimensionamento feito pelas simulações na seção 4, e que serão soldadas no aro e usinadas para encaixar no eixo, e em seguida fixadas através de parafusos, facilitando ajustes e a montagem, conforme mostrado na figura 7.

Figura 7 – Aro de propulsão



Fonte: Autor

4 SIMULAÇÕES

Após o projeto mecânico do aro no Solidworks, foi necessário validar o comportamento do aro ao serem aplicadas as forças, através de análises em elementos finitos.

Durante a propulsão, a força aplicada apresenta três componentes: uma tangencial, uma radial e uma médio-lateral. A Tabela 1 reproduz os valores típicos reportados em Van Drongelen *et al.* (2013) para diferentes velocidades médias típicas de locomoção com cadeiras de rodas.

Tabela 1 - Variação da velocidade em função da força aplicada no aro de propulsão

	0,83 m/s	1,11 m/s	1,38 m/s
Work [J]	35,5 (26,4-37,5)	32,7 (26,0-36,9)	30,1 (27,8-36,0)
Ftot [N]	52,3 (49,5-68,5)	52,6 (45,3-62,1)	49,3 (44,6-56,2)
Ftan [N]	44,6 (41,0-58,1)	44,5 (40,2-55,8)	41,2 (37,6-50,5)
Frad [N]	25,7 (22,6-30,4)	21,7 (16,7-25,8)	21,8 (12,8-29,0)
Flat [N]	-7,5 (-13,8 to -3,5)	-8,5 (-12,8 to -4,8)	-8,0 (-12,3 to -4,1)

Fonte: Elaborado pelo autor adaptado de (VAN DRONGELEN *et al.*, 2013)

Para a análise, foram consideradas as forças para a velocidade de 0,83 m/s, pois são as maiores. Os intervalos observados se referem ao “*Interquartile range*”, ou seja, são os quartis que dividem o conjunto de dados adquiridos em um experimento em quatro partes iguais, e com isso, 25% dos valores coletados estão entre o valor mínimo e a mediana, e os outros 25% dos dados estão entre a mediana e o maior valor. No entanto, para considerar as forças elevadas quando uma pessoa se locomove em uma rampa, essas forças foram aumentadas em 70%, ficando próximas dos valores característicos para inclinações de 4° reportados em Van Drongelen *et al.* (2013). Este aumento também retrata um coeficiente de segurança para garantir que o sistema irá suportar as cargas em testes experimentais, resultando em:

- Força tangencial: 76 N;
- Força radial: 44 N;
- Força médio-lateral: 13 N.

Para as condições de contorno, foi considerada como engastada a região onde a estrutura tubular é rosqueada na roda, e foi selecionado um ponto no aro que receberá a força de propulsão, sendo tomado como base o conjunto de coordenadas cilíndricas para especificar a direção e o sentido das três componentes da força.

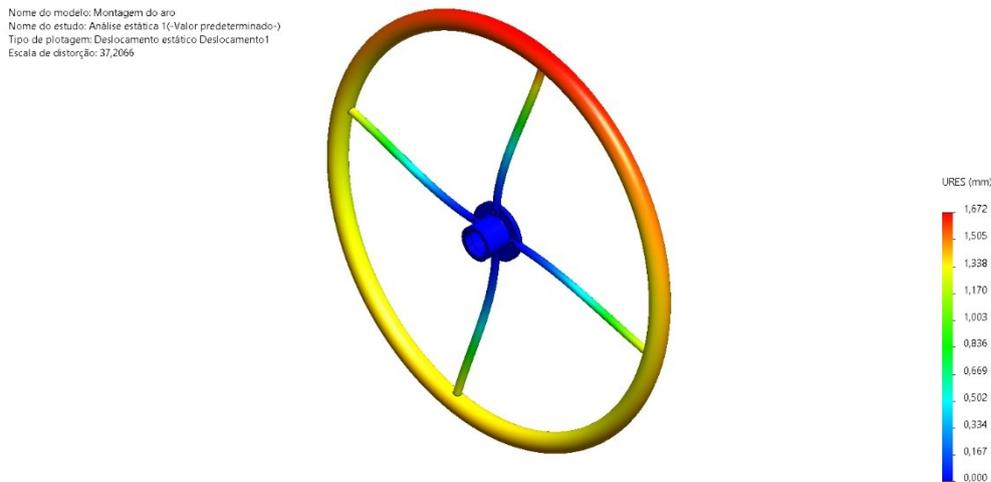
Como o objetivo é analisar o comportamento do eixo e das barras, foi utilizada uma malha com elementos mais refinados somente nesses componentes, deixando a malha do aro mais grosseira já que não é um componente projetado, pois existe padrão de mercado e suas deformações não interferem neste estudo.

Os resultados que foram analisados no eixo são as deformações e a tensão equivalente de Von-Mises. Para as barras, foram analisados os valores dos deslocamentos, pois é necessário que durante a propulsão, o aro desloque-se o mínimo possível, e também as tensões de Von-Mises, para garantir que não haja deformação plástica.

4.1 Resultado das Simulações

Após serem realizadas todas as etapas da simulação, foram obtidas as tensões equivalentes de Von-Mises e as deformações na região do eixo onde serão instalados os *strain gages*. Nas barras, foram obtidos os deslocamentos, e conforme mostrado na figura 8, o máximo deslocamento foi de 1,6 mm, o que representa um deslocamento pequeno e admissível para esta aplicação.

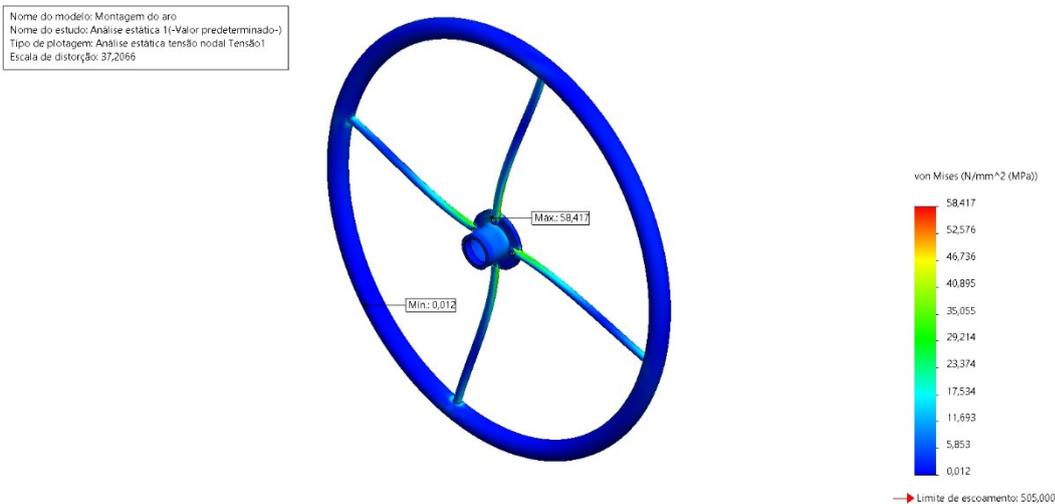
Figura 8 – Deslocamento no aro de propulsão



Fonte: Autor

A plotagem das tensões equivalentes de Von-Mises mostra que a máxima tensão é de 58 MPa nas barras, ficando bem abaixo do escoamento do material empregado, conforme mostrado na figura 9. Isso mostra que o aro possui resistência o suficiente para suportar as forças típicas aplicadas pelo usuário.

Figura 9 - Tensão equivalente (von-Mises) no aro de propulsão

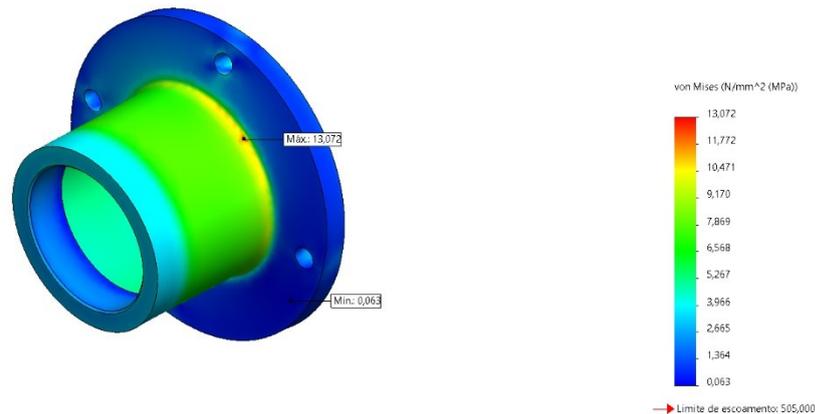


Fonte: Autor

Analisando a plotagem das tensões no eixo, nota-se que as tensões máximas estão próximas aos furos para os parafusos, como era de se esperar, já que são regiões de concentração de tensão, mas que estão abaixo do limite de escoamento, conforme mostrado na figura 10.

Figura 10 - Tensão equivalente (von-Mises) na estrutura tubular

Nome do modelo: Montagem do aro
Nome do estudo: Análise estática 2(-Valor predeterminado-)
Tipo de plotagem: Análise estática tensão nodal Tensão1
Escala de distorção: 818,72



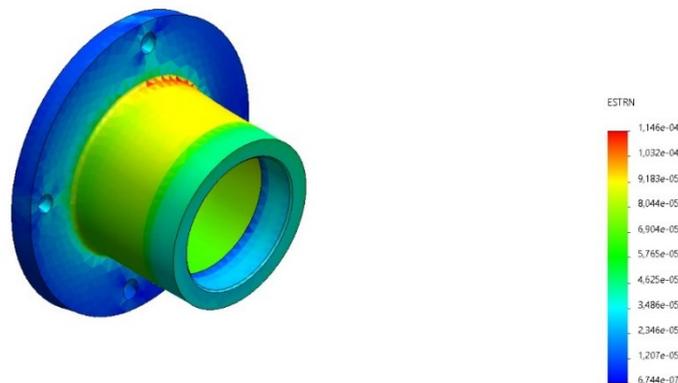
Fonte: Autor

Para que os *strain gages* possam fazer uma leitura das deformações causadas pelo torque que passa pelo eixo, foi necessário que a espessura da parede da estrutura fosse de 2 mm e para suportar os esforços, o diâmetro externo do eixo foi de 44,5 mm. O comprimento foi definido com 40 mm e a rosca que conecta o aro à roda, com 10 mm de comprimento e 34,7 mm de diâmetro. A região onde são fixadas as barras possui 74,5 mm de diâmetro.

A plotagem das deformações do eixo, conforme figura 11, mostra que na região onde será instrumentada, com coloração verde e amarelo, as deformações são de aproximadamente 85 μ d (microdeformações), que são o suficiente para realizarem a leitura.

Figura 11 - Deformações na estrutura tubular

Nome do modelo: Montagem do aro
Nome do estudo: Análise estática 2(-Valor predeterminado-)
Tipo de plotagem: Deformação estática Deformação1
Escala de distorção: 818,72



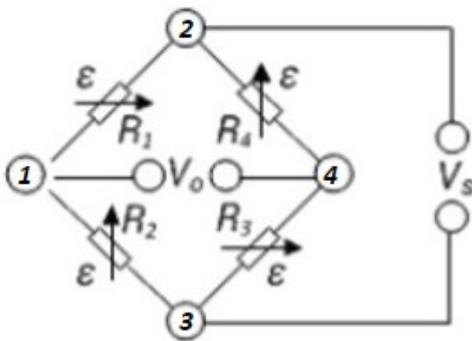
Fonte: Autor

4.2 Extensometria

Os *strain gages* são transdutores cuja resistência elétrica varia com a sua deformação e são capazes de medir pequenas deformações no local do corpo no qual são instalados.

A eletrônica de aquisição é responsável por estimar a variação da resistência do extensômetro e, conseqüentemente, a deformação que ocorre no local em que este é colocado. A medição é realizada por meio de uma ponte de Wheatstone, conforme figura 12, que pode apresentar várias configurações, como ponte completa, $\frac{1}{2}$ ponte, $\frac{1}{4}$ ponte e ponte diagonal, que apresentam números diferentes de *strain gages* ativos.

Figura 12 – Ponte de Wheatstone



Fonte: HBM (2022)

Neste projeto, a determinação da força tangencial aplicada no aro será realizada através da configuração ponte completa, que apresenta quatro *strain gages* posicionados à 45° em relação ao eixo longitudinal. A deformação em um tubo sujeito ao momento torçor com esta configuração é calculada conforme a equação 1.

$$\varepsilon = \frac{8 \cdot T \cdot D}{G \cdot \pi \cdot (D^4 - d^4)} \quad (1)$$

onde: T é o torque aplicado, D é o diâmetro externo do eixo, d é o diâmetro interno do eixo e G é o módulo de elasticidade transversal do alumínio, calculado conforme a equação 2.

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (2)$$

onde: E é o módulo de Young, no valor de 75000 MPa e ν é o coeficiente de Poisson, de 0,3. Substituindo estes valores na equação 2, tem-se que o módulo de elasticidade transversal do alumínio é de 28846 MPa.

Sabendo-se que o raio do aro é de 279,4 mm e a força tangencial considerada de 76 N, tem-se o momento de 21234 N.mm passando pelo eixo tubular. Substituindo este valor e os diâmetros definidos na Eq. 1, a deformação medida pelos *strain gages* é de 68 μd . Comparando este valor com os obtidos pelas simulações percebe-se uma pequena variação, causada pelo efeito das forças radial e médio-lateral, que não são consideradas no cálculo analítico.

5 CONCLUSÃO

O objetivo do desenvolvimento das cadeiras de rodas com propulsão assistida é melhorar a qualidade de vida das pessoas que são portadoras de deficiência motora, reduzindo os problemas causados por movimentos repetitivos e por altas cargas para a locomoção.

Por ser uma nova modalidade de cadeira de rodas, alguns problemas durante seu uso são identificados, como a manobrabilidade em ambientes confinados, indicando que existem possibilidades de melhorias.

O projeto desenvolvido para a instrumentação dos extensômetros, a partir de um eixo tubular que conecta o aro à roda, foi uma forma simples para atingir o objetivo. O projeto foi elaborado com o auxílio de softwares CAD e CAE. Os resultados das simulações mostram que a solução permite medir as forças tangenciais típicas aplicadas em cadeiras de rodas de acordo com a literatura, garantindo a resistência e a rigidez adequadas nas condições usuais de trabalho. Além disso, os resultados mostram que as deformações são suficientes para que extensômetros possam fazer a leitura adequada.

Com este estudo, é possível construir um protótipo do aro e comprovar através de testes práticos os resultados obtidos por simulação e analiticamente, e além disso, desenvolver um projeto elétrico e eletrônica de aquisição para testes e melhorias nas malhas de controle desta modalidade de cadeiras, já que o torque aplicado no aro será conhecido.

REFERÊNCIAS

ALGOOD, S. David et al. Impact of a pushrim-activated power-assisted wheelchair on the metabolic demands, stroke frequency, and range of motion among subjects with tetraplegia. **Archives Of Physical Medicine And Rehabilitation**, [s.l.], v. 85, n. 11, p. 1865-1871, nov. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apmr.2004.04.043>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15520983/>. Acesso em: 18 out. 2021.

ARVA, Julianna et al. Mechanical efficiency and user power requirement with a pushrim activated power assisted wheelchair. **Medical Engineering & Physics**, [S.L.], v. 23, n. 10, p. 699-705, dez. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1350-4533\(01\)00054-6](http://dx.doi.org/10.1016/s1350-4533(01)00054-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350453301000546>. Acesso em: 10 dez. 2021.

BONINGER, Michael L. et al. Propulsion patterns and pushrim biomechanics in manual wheelchair propulsion. **Archives Of Physical Medicine And Rehabilitation**, [s.l.], v. 83, n. 5, p. 718-723, maio 2002. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1053/apmr.2002.32455>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11994814/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico**. 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=9749&t=destaques>. Acesso em: 18 jan. 2022.

COOPER, R.A. *et al.* Performance assessment of a pushrim-activated power-assisted wheelchair control system. **Ieee Transactions On Control Systems Technology**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 121-126, 2002. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

<http://dx.doi.org/10.1109/87.974345>. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/974345>. Acesso em: 10 dez. 2021.

FITZGERALD, Shirley G. *et al.* A Pilot Study on Community Usage of a Pushrim-Activated, Power-Assisted Wheelchair. **Assistive Technology**, [s.l.], v. 15, n. 2, p. 113-119, 31 dez. 2003.

Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10400435.2003.10131895>. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10400435.2003.10131895>. Acesso em: 10 dez. 2021.

GMOBILITY. **Cadeira de rodas com propulsão assistida**. Disponível em:

<https://www.gmobility.com.au/>. Acesso em: 18 jan. 2022.

GUILLON, Bruno *et al.* Evaluation of 3 Pushrim-Activated Power-Assisted Wheelchairs in Patients With Spinal Cord Injury. **Archives Of Physical Medicine And Rehabilitation**, [s.l.], v. 96, n. 5, p. 894-904, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apmr.2015.01.009>.

Disponível em: [https://www.archives-pmr.org/article/S0003-9993\(15\)00039-8/fulltext](https://www.archives-pmr.org/article/S0003-9993(15)00039-8/fulltext).

Acesso em: 10 dez. 2021.

HBM. **O circuito de ponte de Wheatstone**: aprenda o básico e a teoria de operação. São Paulo. 2022? Disponível em <https://www.hbm.com/pt/7163/circuito-de-ponte-de-wheatstone/>.

Acesso em: 25 jan. 2022.

KLOOSTERMAN, Marieke G.M. *et al.* Effect of power-assisted hand-rim wheelchair propulsion on shoulder load in experienced wheelchair users: a pilot study with an instrumented wheelchair. **Medical Engineering & Physics**, [s.l.], v. 37, n. 10, p. 961-968, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.medengphy.2015.07.004>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350453315001769?via%3Dihub>.

Acesso em: 10 dez. 2021.

Acesso em: 10 dez. 2021.

KLOOSTERMAN, Marieke Gm *et al.* A systematic review on the pros and cons of using a pushrim-activated power-assisted wheelchair. **Clinical Rehabilitation**, [s.l.], v. 27, n. 4, p. 299-313, 5 set. 2012. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0269215512456387>.

Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0269215512456387>. Acesso

em: 10 dez. 2021.

LEVY, Charles e *et al.* Variable-ratio pushrim-activated power-assist wheelchair eases wheeling over a variety of terrains for elders11A commercial party with a direct financial interest in the results of the research supporting this article has conferred or will confer a financial benefit on the author or 1 or more of the authors. **Archives Of Physical Medicine And Rehabilitation**, [s.l.], v. 85, n. 1, p. 104-112, jan. 2004. Elsevier BV.

[http://dx.doi.org/10.1016/s0003-9993\(03\)00426-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0003-9993(03)00426-x). Disponível em:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14970977/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

ORTOPONTO. **Cadeira de rodas motorizada**. Disponível em: <https://www.ortoponto.com.br/busca?q=Cadeira+de+rodas+motorizada>. Acesso em: 18 jan. 2022.

POLIFISIO. **Cadeira de rodas com propulsão manual**. Disponível em: <https://www.polifisio.com.br/cadeiras>. Acesso em: 18 jan. 2022.

WOUDE, L.H.V van Der *et al.* Biomechanics and physiology in active manual wheelchair propulsion. **Medical Engineering & Physics**, [s.l.], v. 23, n. 10, p. 713-733, dez. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1350-4533\(01\)00083-2](http://dx.doi.org/10.1016/s1350-4533(01)00083-2). Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11801413/>. Acesso em: 10 dez. 2021.

VAN DRONGELEN, Stefan *et al.* Effect of workload setting on propulsion technique in handrim wheelchair propulsion. **Medical Engineering & Physics**, [s.l.], v. 35, n. 3, p. 283-288, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.medengphy.2012.04.017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350453312001038>. Acesso em: 10 dez. 2021.

WATERS, Robert L.; MULROY, Sara. The energy expenditure of normal and pathologic gait. **Gait & Posture**, [s.l.], v. 9, n. 3, p. 207-231, jul. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0966-6362\(99\)00009-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0966-6362(99)00009-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0966636299000090?via%3Dihub>. Acesso em: 10 dez. 2021.

Sobre os autores:

ⁱ Luis Henrique Pereira de Almeida



Possui graduação em Engenharia Mecânica pelo Centro Universitário FEI (2021), cursando atualmente a Pós-Graduação em Projetos de Mecânica Industrial pela Escola e Faculdade de Tecnologia SENAI Roberto Simonsen (2022). Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Projetos de HVAC e sistemas hidráulicos. Atualmente atua como desenhista projetista mecânico responsável por projetos mecânicos de sistemas de pulverização precisa.

ii Leandro Cardoso da Silva



Graduação em Engenharia de Produção Mecânica pelo Centro Universitário Nove de Julho, Mestrado em Engenharia dos Materiais pela Universidade Presbiteriana Mackenzie e Doutorando em Engenharia Mecânica na Universidade de São Paulo. Atuação nos seguintes temas: Tem experiência industrial e acadêmica nas áreas de engenharia industrial, mecânica automobilística, materiais poliméricos, análise estrutural por elementos finitos, manutenção industrial, cadeia de suprimentos, logística, administração geral e produção, planejamento e controle da produção e gestão organizacional. Na indústria trabalhou por 14 anos em empresas multinacionais no setor automotivo na área de desenvolvimento de produto, voltados para os componentes de suspensão do motor, comandos de passagem de marcha, conjunto pedaleira, sistema de exaustão e admissão de ar para caminhões, ônibus e automóveis.

iii Nelis Evangelista Luiz



6 anos de Experiência Profissional como Proprietário da Empresas de Projetos NEL. Atualmente, mantêm-se nesta empresa. 4 anos e 10 meses de Experiência Profissional na SIN – Sistema de Implante Nacional, na área de desenvolvimento. 3 anos de Experiência Profissional no Grupo Gerdau, atuando na área tecnológica de desenvolvimento de aços. 03 anos e 10 meses de Experiência Profissional na área de magistério de nível Superior no SENAI-SP. 02 anos de Experiência Profissional na área de magistério de nível Superior na Uninove.

iv Erick Toshio Yamamoto



Doutorando em Automação Industrial. Mestre em Automação e Controle de Processos pelo IFSP; Engenheiro de Controle e Automação pelo IFSP; Professor IFSP e Senai; Pesquisador Acadêmico do IFSP com ênfase em Automação e Controle utilizando Métodos não convencionais de controle; Membro IEEE e CREA. Consultor Técnico e de Vendas Treinamentos/ Produtos da FESTO Brasil Ltda.; Engenheiro de Aplicação na National Instruments Brazil Ltda.; Consultor em Automação para residências e indústrias. Linhas de Pesquisas: Automação e Controle; Inteligência Artificial; Domótica; Aprendizado de Máquinas. Eficiência Energética

v Ricardo Hovacker Baldaconi



Atua a mais de 12 anos como docente na área de eletrônica e programação de microcontroladores; Mestre no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / USP) na área de Tecnologia Nuclear; Pós-graduado em Automação e Controle pelo SENAI-SP; Licenciado em Tecnologia em Mecatrônica com habilitação para formação técnica profissional pela FATEC-SP/ Centro Paula Souza; Graduado em Tecnologia em Mecatrônica pela Universidade Nove de Julho; Atualmente é professor universitário na faculdade Senai “Roberto Simonsen”. Atuou em empresas de Pesquisa e

Desenvolvimento, na área de projetos embarcados, sistemas críticos, controle de acesso, segurança e automação.

vi Carlos César Pestana



Mestrando em Engenharia de Materiais (USP). MBA em Gestão de Negócios (UNINOVE). Especialista em Gestão de Projetos (USP). Engenharia Mecânica (UNIP). Engenheiro Militar (CPOR). Técnico em Mecânica de Precisão (SENAI Suíço-Brasileira). Experiência Profissional: Gestão de projetos de expansão fabril; Implantação de Lean Manufacturing (Just-in-Time, Kanban, aumento de produtividade industrial); Gestão de Manutenção para plataforma marítima; Projeto manutenção para equipamentos on-shore e off-shore; Coordenação das atividades da Engenharia e acompanhamento o planejamento, projeto, fabricação, controle de prazos e custos, implantação até a produção; Coordenação das atividades de projetos, fabricação e montagem. Desenvolvimento projetos de máquinas, equipamentos, dispositivos e produtos; possui 10 anos de experiência como Professor de Ensino Superior em cursos de Graduação e Pós-Graduação.

vii Antônio Carlos Lemos Carvalho



Master in Business Administration na área de Serviços em Engenharia de Comunicação de Dados pela Universidade Federal Fluminense, especialista em Educação nas áreas de Supervisão, Direção, Coordenação e Orientação Educacional pelo Centro Universitário de Araras "Dr. Edmundo Ulson", possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica pela PUC-SP e Licenciatura em Matemática pela Universidade Cruzeiro do Sul. Atuei na área de produção e manutenção industrial por 10 anos antes de iniciar a jornada profissional acadêmica em Instituições de Ensino Profissionalizantes e de Ensino Superior. Desde sua fundação em 2012 até os dias atuais, estou Coordenador da Faculdade de Tecnologia SENAI "Roberto Simonsen", totalizando 20 anos na Instituição, onde comecei como Técnico de Ensino em 2002. Além disto, estou há 15 anos como professor titular de Física do Centro Paula Souza, atuando junto à ETEC Santa Ifigênia no prédio da Administração Central do CEETPS.

viii Norberto Goncalves Neto



Formação acadêmica: Graduação em Tecnologia Mecânica pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo, Especialização em Administração Industrial pela Universidade de São Paulo, Especialização em Programa Especial de Formação Pedagógica pelo Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Mestrado profissional em Processos Industriais Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Profissional com experiência adquirida em todas as etapas da cadeia industrial, desde empresas de pequeno a grande porte, como também nas de: economia mista, nacional e multinacional, nos segmentos: automobilístico, autopeças, metal-mecânica, plástico, consultivo e educacional.