REPRODUTIBILIDADE E APLICABILIDADE DE UM MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO MOMENTO DE INÉRCIA PARA TESTES DE ESFORÇO EM UM DINAMÔMETRO PARA CADEIRAS DE RODAS

REPRODUCTIBILITY AND APPLICABILITY OF A METHOD FOR EVALUATING THE MOMENT OF INERTIA FOR EFFORT TESTS IN A WHEELCHAIR DYNAMOMETER

Saulo Fernandes Melo de Oliveira
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Vitória de Santo Antão, PE, Brasil
saulo.fernandesmelo@ufpe.br

Afonso Augusto Guimarães Bione
Universidade de Pernambuco (UPE)
Recife, PE, Brasil
afonso@recife.pe.gov.br

Lúcia Inês Guedes Leite de Oliveira
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Recife, PE, Brasil
inesgloliveira@gmail.com

Manoel da Cunha Costa
Universidade de Pernambuco (UPE)
Recife, PE, Brasil
manoel.costa@upe.br

Resumo. Para testar um método para avaliação do momento de inércia em um dinamômetro para cadeiras de rodas, com 24h de diferença, dois avaliadores realizaram o procedimento de calibração com incrementos de massa conhecida, nos lados direito e esquerdo do protótipo. Em seguida, 6 sujeitos saudáveis do gênero masculino (peso: média=67,14; desvio-padrão=4,41kg; estatura: média=1,73 ± desvio-padrão=4,41m), realizaram protocolo de sprint em máxima velocidade por 20s. Os valores de momento de inércia determinados pelo modelo experimental foram comparados com o MI calculado pelo modelo teórico. Adicionalmente, os valores de potência determinados com uso do modelo experimental foram comparados com aqueles calculados pelo modelo teórico. Os resultados da plotagem de Bland-Altman e de coeficiente de correlação intraclasse evidenciaram ótimos resultados de reprodutibilidade intra (r=0,94, avaliador A; e 0,92, avaliador B; p<0,01) e interavaliadores (r=0,94, lado direito; 0,95, lado esquerdo; p<0,01). O teste de hipótese mostrou valores estatisticamente diferentes aqueles de MI e PO aqueles calculados pelo modelo teórico (P<0,0001). Conclui-se que o sistema cumpre o seu papel de calibração, mostrando-se como uma alternativa necessária para o controle da confiabilidade dos dados obtidos em testes com dinamometria para usuários de cadeiras de rodas.

Palavras-chave: testes de esforço; biomecânica; locomoção; pessoas com deficiência; plataforma arduino.

Abstract. In order to test of a method for evaluating the moment of inertia in a wheelchair dynamometer, with 24h of difference, two evaluators performed the calibration procedure with known mass increments on both sides (right and left) of the prototype. Then, 6 healthy male subjects (weight: average= 67.14 ± standard deviation=4.41kg; height: average=1.73 ± standard deviation=4.41m), performed sprint protocol at maximum speed for 20s. The moment of inertia values determined by the experimental model were compared with the MI calculated by the theoretical model. In addition, the power values determined using the experimental model were compared with those calculated by the theoretical model. The results of the Bland-Altman plot and the intraclass correlation coefficient showed excellent intra-reproducibility results (r = 0.94, evaluator A; and 0.92, evaluator B; p <0.01) and interraters (r = 0.94, right side; 0.95, left side; p <0.01). The hypothesis test showed values statistically different from those of MI and PO those calculated by the theoretical model (P <0.0001). It is concluded that the system fulfills its role of calibration, proving itself as a necessary alternative for the control of the reliability of the data obtained in tests with dynamometry for users of wheelchairs.

Keywords: effort test; biomechanics; locomotion; people with disabilities; arduino board.

INTRODUÇÃO

No âmbito da pesquisa científica, ou mesmo em centros de reabilitação e treinamento físico destinados à pessoas com deficiência, equipamentos ergométricos são utilizados para verificar as capacidades físicas em usuários de cadeiras de rodas. Ainda que sob o enfoque de análise em dinamometria, alguns equipamentos possuem sistemas de incrementos de carga adicional, requerendo alterações ergonômicas dos sujeitos e limitando sua utilização aos valores mínimos de potência ou carga de frenagem impostas em testes de esforço, nem sempre suportadas por sujeitos de diferentes deficiências. Nesse aspecto, oportunizar protótipos que permitam verificar a máxima potência produzida pelo binômio usuário+cadeiras de rodas torna-se uma necessidade da prática na avaliação do desempenho neste público.

Do ponto de vista funcional e ergonômico, a capacidade de propulsão manual em cadeiras de rodas constitui-se num movimento pouco eficiente (Woude et al., 1986; Vanlandevijck et al., 1994), estando

dependente das interações existentes no conjunto cadeira de rodas+usuário (Devillard et al., 2001). Neste sentido Vanlandevijck et al. (1994), em estudo clássico, encontraram baixos valores de eficiência mecânica e alterações significativas nos padrões de propulsão manual quando testados sujeitos experientes a partir de 1,67 e 2,22 m/s (6,01 e 7,92 km/h). Além da velocidade, a carga externa (PO) utilizada para opor-se ao movimento simulado de locomoção constitui-se em fator de diminuição da eficiência mecânica e aumento do dispêndio energético relacionado à atividade. Neste sentido, a avaliação ergonômica e funcional desse público necessita de equipamentos de possam eliminar fatores deletérios a eficiência do movimento. Por esses motivos, os equipamentos que permitem a utilização da própria cadeira de rodas dos sujeitos tornam-se a melhor opção para avaliação da maior capacidade de propulsão manual (Devillard et al., 2001; Niesing et al., 1990; Shimada et al., 1995).

Análises realizadas em equipamentos ergométricos para usuários de cadeiras de rodas permitem a verificação da máxima capacidade de trabalho muscular, por intervalos de tempo definidos. Baseiam-se na determinação de uma carga externa, sendo considerada a força de frenagem e representada pelas grandezas físicas força, kilogramas ou newtons, e pelo espaço ou tempo decorrido até vencer esta resistência que se opõe ao movimento. A partir da relação entre essa força de frenagem, o tempo e o espaço percorrido por esta força, obtêm-se a potência externa, ou potência resultante (eq. 1), variável que está presente na esmagadora maioria dos equipamentos destinados ao treinamento e avaliação do condicionamento físico.

$$PO = f \cdot \frac{d}{t} \text{ ou } PO = f \cdot v \quad [1]$$

Onde f, d, t e v são respectivamente, força, distância, tempo e velocidade. Esses indicadores também podem ser transferidos para outros equipamentos de caráter dinamométrico ou de potência muscular. Após a determinação dessa variável, é possível conjecturar e relacioná-la com outros indicadores relacionados ao desempenho físico tais como a eficiência mecânica (eq. 2).

$$EF(\%) = \left(\frac{PO}{VO_2}\right) \cdot 100 \quad [2]$$

Em estudos experimentais ou para desenvolvimento de novas técnicas de exercitação é de fundamental importância a demonstração dos pressupostos mecânicos e físicos que intervêm no movimento. Entre as grandezas que participam do movimento a inércia (I) configura-se como uma força de característica posicional e geométrica, sendo considerada como a possibilidade de oferecer resistência ao movimento, quer seja este linear ou rotacional (Hall, 2000; Okuno, 2003). No plano físico, a inércia de um corpo é representada pela relação entre massa e o tamanho dos corpos. A massa pode ser determinada por procedimentos mecânicos ou eletrônicos de medição do peso e o tamanho considera-se como sendo a distância geométrica entre as extremidades do mesmo corpo. Para os movimentos rotacionais considera-se o análogo da inércia, conhecido como Momento de Inércia (MI). Matematicamente ambas grandezas podem ser calculadas conhecidas as dimensões e o volume dos corpos (eq. 3). A maioria dos procedimentos existentes (Devillard et al., 2001; Theisen et al., 1996; DiGiovine et al., 2001), consideram as propriedades dos materiais que participam do movimento e, a partir da aplicação de procedimentos matemáticos, se equalizam as forças atuantes e que freiam o seu desenvolvimento normal.

$$MI = \frac{1}{2} M \cdot R^2 \quad [3]$$

Percebe-se então que os instrumentos devem possuir procedimentos de calibração de acesso fácil, rápido e que considere não só as dimensões geométricas ma também as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos no processo. Recentemente foi desenvolvido um equipamento compacto para avaliação da potência em cadeiras de rodas, com o objetivo de identificar a máxima capacidade de geração de trabalho mecânico em usuários correntes e esportivos (Oliveira et al., 2017). Devido ao baixo volume para facilitar o seu transporte, as partes que o constituem possuem dimensões menores quando comparado com outros modelos existentes (Shimada et al., 1995). Esta característica de sua manufatura requer um método de calibração condizente que a objetividade e acessibilidade do novo dinamômetro. Por esses motivos, os objetivos da presente investigação são: a) verificar a reprodutibilidade do sistema de calibração

do referido protótipo; e b) analisar a aplicabilidade do método comparando os valores de potência calculados pelos modelos experimental e teórico do momento de inércia. Acreditamos na hipótese de que o procedimento demonstrado neste trabalho possui valores aceitáveis de reprodutibilidade e aplicabilidade, apresentando valores distintos de potência quando comparado ao modelo teórico-geométrico.

MATERIAIS E MÉTODOS

Sistema de cilindros para testes de esforço

Partes mecânicas: o dinamômetro compacto (DINACOM) é um sistema mecatrônico desenvolvido por pesquisadores da Escola Superior de Educação Física em parceria com o Núcleo de Educação à Distância, ambos grupos da Universidade de Pernambuco. O objetivo principal do equipamento é a avaliação da potência propulsiva em cadeiras de rodas, possibilitando a utilização, por parte do usuário, do seu próprio instrumento de locomoção e/ou treinamento esportivo. Para acomodação do peso do conjunto sujeito+cadeira de rodas, foram conectados dois sistemas de cilindros (Easy Scroll, Brasil) dispostos paralelamente e unidos pelas suas extremidades pelas suas hastes de sustentação laterais. Cada sistema é composto por três cilindros separados por duas distâncias distintas (0,1 e 0,2 m), para que possam ser produzidos efeitos maiores e menores de resistência ao rolamento no momento de sua utilização. A resistência ao rolamento constitui-se na força de oposição ao movimento de giro dos pneus em uma determinada superfície (Sauret et al., 2012), que é aumentada na conformação de maior distância entre os cilindros (0,2 m). O cilindro central é considerado o cilindro de instrumentação (CIN), onde são conectados dois objetos circulares metálicos para acionamento dos sensores de rotação. Cada cilindro possui comprimento de 0,45 m, perímetro de 0,24 m e massa 1,6 kg.

Partes eletroeletrônicas: Os dados de rotação dos cilindros são coletados por meio de dois sensores de rotação do tipo indutivo (Sensorbrás, Brasil), com capacidade de acionamento fixada em 60Hz pelo fabricante. Para transmissão e interpretação dos sinais eletrônicos utilizou-se plataforma de hardware e software abertos Arduino® (Arduino, Itália), especialmente programada para interface física com o mundo externo a partir das informações advindas de diversos meios de comunicação. A placa foi devidamente programada para leitura dos sinais em intervalos menores que 1 segundo. Simultaneamente seus sinais são transmitidos a um computador pessoal para amostragem e armazenamento das informações em arquivos do tipo xlsx ou xls (Office Excel for Windows, Estados Unidos). A comunicação entre a placa Arduino® e o Excel é realizada por meio do software PLX-DAQ (Parallax, Estados Unidos).

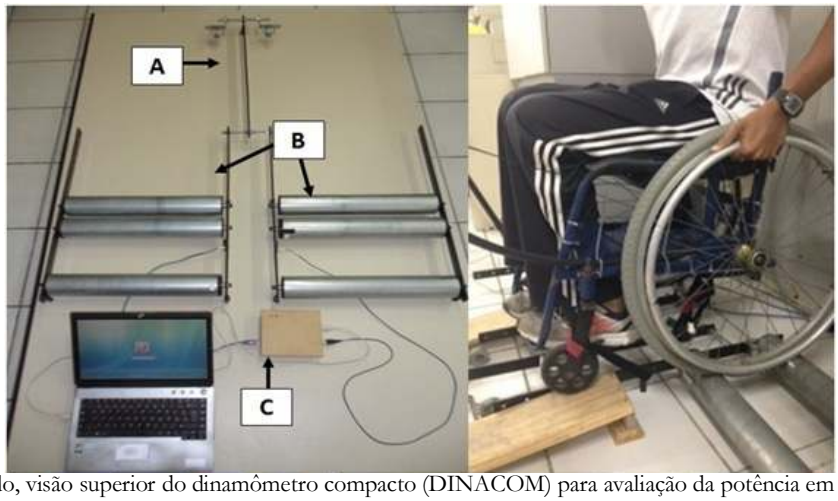

Figura 1. Lado esquerdo, visão superior do dinamômetro compacto (DINACOM) para avaliação da potência em cadeiras de rodas: (A) sistema de calibração; (B) cilindros de movimentação; (C) conversor analógico-digital; lado direito uma foto demonstrando o posicionamento do indivíduo no momento do teste de esforço.

Sistema de calibração e cálculo da potência propulsiva: Pupo e Ziemath (2009), demonstraram um procedimento padronizado para verificação do momento de inércia experimental, utilizando a relação entre aceleração rotacional, a transmissão da energia cinética entre objetos e a resistência padrão de oposição ao movimento, conforme procedimentos contidos nas equações 5, 6 e 7. Um objeto de massa conhecida é suspenso por uma haste de calibração localizada na região central do DINACOM a uma altura de 0,45m.

Após a sua liberação, a massa mantém sua velocidade constante até alcançar o ponto mais baixo (solo). Este objeto é conectado por um fio de nylon de 0,1mm (Fabricante, Brasil) ao cilindro de instrumentação, transmitindo a sua velocidade e energia cinética. Uma foto mostrando a organização do procedimento é apresentada na figura 2.

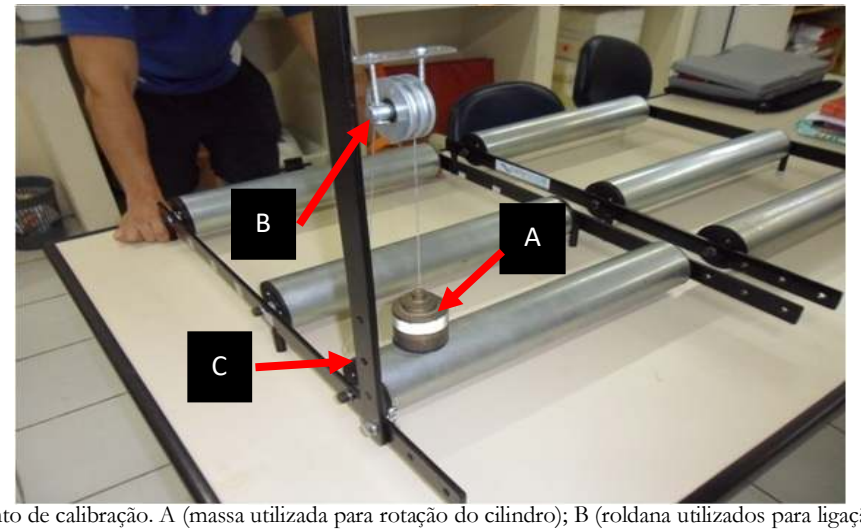

Figura 2. Procedimento de calibração. A (massa utilizada para rotação do cilindro); B (roldana utilizados para ligação entre a massa e o cilindro); C (haste para elevação da massa até uma posição perpendicular ao DINACOM).

Dessa forma, considerando as equações de velocidade e energia cinética temos que:

$$MI = \frac{2m}{w^2}\left(gh - \frac{v^2}{2}\right) \quad [4]$$

Onde *h* é a altura, *v* a velocidade e *w* é a velocidade angular do cilindro de instrumentação. Considerando que:

$$h = \left(\frac{1}{2}\right)at^2 \quad [5]$$

$$v = at \quad [6]$$

$$w = \frac{v}{R} \quad [7]$$

Substituindo os valores na equação original, podemos considerar que o momento de inércia para o sistema de calibração organizado do DINACOM seria:

$$MI = \frac{2m}{\left(w = \frac{v}{R}\right)^2}\left(g\left\{\left[\frac{1}{2}\right]at^2\right\} - \frac{[at]^2}{2}\right) \quad [8]$$

Simplificando os valores da equação 8, por meio de procedimentos matemáticos obtemos o seguinte modelo matemático para determinação do momento de inércia:

$$MI = mR^2\left(\frac{g-a}{a}\right) \quad [9]$$

Onde m e R^2 são a massa e o raio do cilindro de instrumentação, respectivamente, *g* a aceleração da gravidade (determinada em $10m/s^2$) e *a* a aceleração do cilindro de instrumentação no intervalo de tempo decorrido até que o objeto toque o solo. A partir da consideração da força padronizada de oposição ao

movimento rotacional, e considerando a distância linear percorrida pelos cilindros em cada rotação completa (0,24m), aplicando o MI nas equações que determinam o trabalho mecânico (eq. 1) gerado a cada giro do DINACOM, temos que a potência (em watts) pode ser determinada da seguinte forma:

$$PO\ (W) = \frac{RPM \cdot MI \cdot 0{,}24}{t} \qquad [10]$$

Onde RPM é o número de rotações desenvolvidas pelo cilindro por minuto, MI o momento de inércia determinado pelo sistema de calibração, 0,24 a constante linear de distância percorrida após um giro completo do cilindro e *t* o tempo decorrido de cada giro.

Reprodutibilidade e aplicabilidade do Sistema de Calibração

Para verificar a reprodutibilidade do sistema desenvolvido para calibração do momento de inércia (MI) dos cilindros de instrumentação utilizou-se procedimento de teste-reteste por dois avaliadores independentes. Cada pesquisador realizou o procedimento de calibração com incremento de 10 massas conhecidas (0,01 kg). Para cada incremento de pesos o procedimento de calibração foi repetido em triplicata e considerado o valor de MI mediano entre as medidas e armazenamento das informações pelo sistema eletroeletrônico. Todas as massas foram medidas previamente cada tentativa (Marte, Brasil) em balança mecânica com precisão de 0,01 kg. Após a verificação de ambos os pesquisadores, os valores de MI experimental foram comparados ao método teórico (eq.4) para verificação da aplicabilidade do método experimental desenvolvido especialmente para o protótipo.

Adicionalmente, 6 voluntários não usuários de cadeiras de rodas (67,14 ± 4,41kg; 1,73 ± 4,41m) participaram de um protocolo experimental d esforço máximo no DINACOM. Os sujeitos tiveram as informações de massa corporal e estatura coletados em equipamentos calibrados e segundo padronização internacional (*International Standartization of Advance Kinantropometry*, 2002). Após explicação de todos os procedimentos de coleta, os sujeitos assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido e concordaram em participar do estudo. Esta fase da pesquisa está devidamente protocolizada no Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos da Universidade de Pernambuco (n. 078/2011, CEP-UPE).

Os voluntários se posicionaram no DINACOM por meio de uma cadeira de rodas específica para prática de basquetebol, com eixo de cambagem de 0° e pressão dos pneus máxima fixada em 60psi, para diminuir os efeitos de resistência ao rolamento. A cadeira de rodas foi travada no dinamômetro utilizando cintos de segurança, com o objetivo de produzir o mínimo de movimentos laterais ou longitudinais e manter o equilíbrio dos usuários. Após período de aquecimento de 1 minuto, os voluntários realizaram sprint de 20 segundos, a máxima velocidade de movimentos possível. Os valores de rotação foram coletados em intervalos de tempo menores que 1 segundo, sendo considerados para as análises apenas os 10 segundos iniciais do teste de sprint. Este procedimento está em conformidade com estudos anteriores que avaliaram a potência propulsiva em usuários de cadeiras de rodas (Devillard *et al.*, 2001; Faupin *et al.*, 2008).

Procedimentos Estatísticos

Os dados foram analisados por meio de estatística exploratória, para verificação dos pressupostos de normalidade dos dados utilizando teste de Kruskal-Wallis. No intuito de verificar a reprodutibilidade do sistema de calibração os valores de MI experimental advindos de ambos os avaliadores e lados do DINACOM foram plotados por meio dos procedimentos de Bland-Altman, com determinação dos limites superior e inferior de concordância. Adicionalmente calculou-se o coeficiente de correlação intraclasse tanto para os lados do DINACOM quanto para os dois avaliadores. Para verificar a objetividade do sistema de calibração, os valores de MI e PO experimental foram comparados por meio de teste *t* simples, utilizando como parâmetros de referência o MI e a PO calculados por meio do modelo teórico matemático. Os dados foram analisados utilizando os pacotes estatísticos SPSS (IBM, versão 20.0, Estados Unidos) e Graphpad Prism (Graphpad, versão 5.0, Estados Unidos). Para todas as análises considerou-se significativo um valor de $P \leq 0{,}05$.

RESULTADOS

Os valores dos índices de reprodutibilidade intra e interavaliadores estão divididos na tabela 1, que trata dos valores relativos ao coeficiente de correlação intraclasse e na figura 5, onde estão disponíveis os gráficos produzidos conforme procedimentos de Bland-Altman.

Tabela 1. Coeficientes de reprodutibilidade inter e intra-avaliadores.

CCI – intra A	**CCI – intra B**	**CCI – Inter**	
CCI (D-E)	CCI (D-E)	CCI-D	CCI-E
0,94*	0,92*	0,94*	0,95*

CCI: Coeficiente de correlação intraclasse; A e B: primeiro e segundo avaliadores, respectivamente; *valores estatisticamente significativos (P < 0,01).

Percebeu-se valores satisfatórios e significativos tanto para os índices de reprodutibilidade intra como interavaliadores (P<0,05). Da mesma forma, os valores medianos de MI obtidos pelos dois avaliadores apresentaram-se significativamente diferentes em comparação aos modelos teóricos matemático (tabela 2).

Tabela 2. Comparação dos valores de MI determinados pelo modelo experimental proposto e pelo modelo teórico físico-matemático.

Massas (Kg)		**Valores de MI médios (Kg.m)**		**Desvios-padrão (Kg.m)**	
E	D	E*	D*	E	D
0,210		0,0140	0,0155	0,0000	0,0005
0,220		0,0140	0,0152	0,0000	0,0004
0,230		0,0132	0,0148	0,0004	0,0004
0,240		0,0130	0,0140	0,0000	0,0000
0,250		0,0130	0,0140	0,0000	0,0000
0,260		0,0128	0,0140	0,0004	0,0000
0,270		0,0120	0,0133	0,0000	0,0005
0,280		0,0120	0,0130	0,0000	0,0000
0,290		0,0120	0,0130	0,0000	0,0000
0,300		0,0120	0,0128	0,0000	0,0004
0,310		0,0117	0,0122	0,0005	0,0004

*Valores estatisticamente significativos quando comparados a amostra de MI de referência (0,0003675 kg·m2); E (esquerda); D (direita).

Quando analisados os gráficos de Bland-Altman percebe-se que vieses não significativos para o viés (diferença média entre os métodos) intra e interavaliados, apesar dos lados dos cilindros apresentarem MI médios diferentes entre si para uma mesma massa deslocada (Figura 3). Da mesma forma, os dados de MI obtidos nos lados direito e esquerdo do DINACOM e pelos avaliadores encontram-se dentro dos limites de concordância estabelecidos, em um intervalo de confiança de 95%.

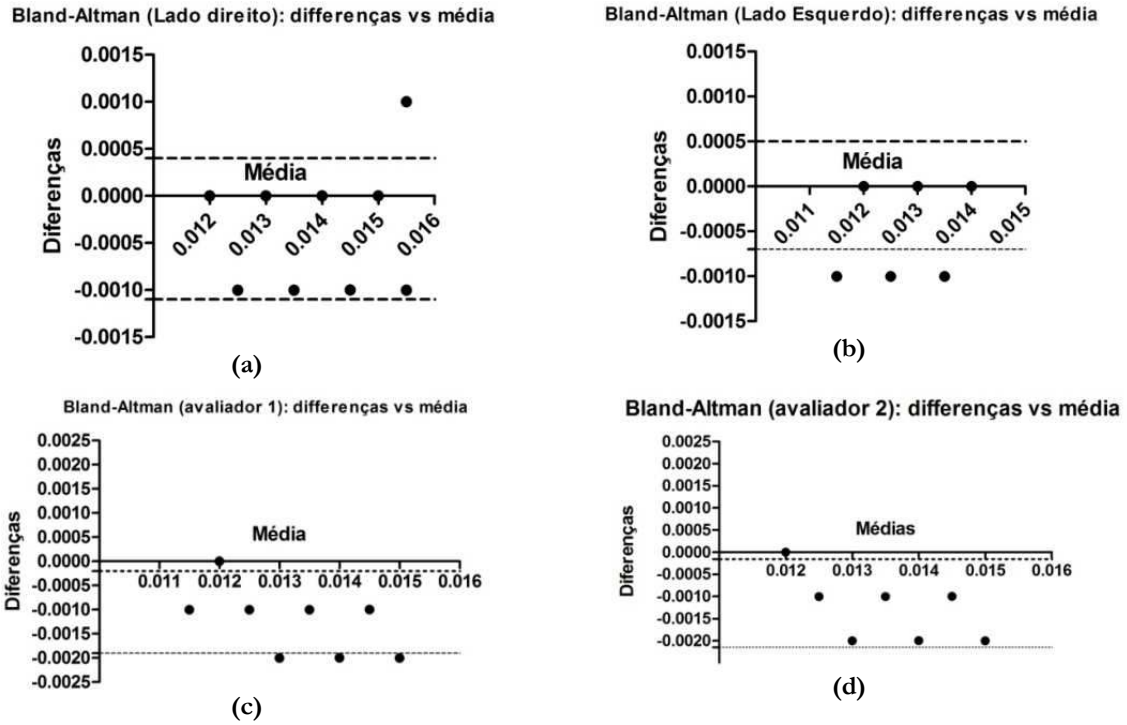

Figura 3 (a-d). Plotagem de Bland-Altman para os valores do momento de inércia (MI). (a) Reprodutibilidade interavaliador para o MI do lado direito; (b) Reprodutibilidade interavaliador para o MI do lado esquerdo; (c) Reprodutibilidade intravaliador 1; (d) Reprodutibilidade intravaliador 2.

Quando analisados a objetividade do sistema de calibração foram encontradas diferenças estatisticamente significativas ($P < 0,0001$) entre os valores de PO obtidos pelo DINACOM comparados aos valores de PO calculados por meio do modelo matemático de determinação do MI (Tabela 3).

Tabela 3. Valores de rotação e potência adquiridos pelo DINACOM e comparação com o modelo obtido pelo método teórico de MI.

Lados	ROT_{ACUM} no DINACOM	PO_{ACUM} no DINACOM (W)
D	90,50±14,90	3,04±0,50†
E	82,67±10,07	2,98±0,34*

* Diferença estatisticamente significativa para o valor de referência (0,0007285 W)
† Diferença estatisticamente significativa para o valor de referência (0,0007982 W)

DISCUSSÃO

O objetivo da presente investigação foi verificar a reprodutibilidade e aplicabilidade do método de calibração para um dinamômetro compacto desenvolvido no intuito de medir a potência propulsiva em cadeiras de rodas. Com base nos resultados estatísticos de objetividade e fidedignidade constaram-se altos níveis de confiabilidade do método, demonstrando que o sistema cumpre seu papel principal. Da mesma forma, perceberam-se diferenças pequenas no MI entre ambos os lados do protótipo (direito e esquerdo), fato este que reforça a necessidade de considerar o modelo experimental em detrimento do modelo teórico.

DiGiovine et al. (2001) encontraram valores de MI menores do que os encontrados no atual estudo. Além deste achado, o modelo de equipamento analisado pelos autores possui maiores diferenças entre os lados de propulsão. Ainda que as diferenças sejam pequenas, com valores de MI abaixo daqueles apontados em investigações anteriores, acreditamos que essas diferenças podem influenciar fortemente os resultados obtidos pelos modelos em ergometria e dinamometria, conforme verificado a partir da análise de objetividade realizada no presente estudo. Isto se deve às características mecânicas e de utilização dos sistemas de cilindros que, com base na freqüência, tipo e nível de lubrificação existentes podem modificar fortemente a capacidade de movimento rotacional.

Diferente dos modelos do presente estudo, bem como daquele demonstrado por Digiovine et al. (2001) e Devillard et al. (2001), analisando um modelo de ergômetro adaptado a todas as cadeiras de rodas (VP-100), utilizou o peso corporal dos sujeitos somado a massa das cadeiras de rodas como variáveis de influência na inércia dinâmica do equipamento. Isto se deve às diferenças geométricas existentes entre o DINACOM e VP-100, que possuem diâmetros dos cilindros de rotação distintos, sendo o menor diâmetro mais suscetível às influências do conjunto sujeito+cadeiras de rodas. Cabe ressaltar aqui que o modelo proposto na presente investigação possui características de dinamometria, diferenciando-se, portanto, dos modelos anteriormente desenvolvidos.

Finley et al. (2002), verificaram valores satisfatórios para o coeficiente de correlação intraclasse quando analisaram as variáveis cinemáticas da propulsão manual em não usuários de cadeiras de rodas. Contudo, os valores foram inferiores aqueles encontrados no presente estudo. No mesmo sentido, Theysen et al. (2006) verificaram a confiabilidade de um novo método para determinação da carga externa por meio de um modelo matemático que reúne características do conjunto usuário+cadeira de rodas. Os valores de correlação apresentaram-se similares ao presente estudo ($R^2 > 0,95$).

O pressuposto de confiabilidade medido por meio da reprodutibildade constitui-se em uma das diversas características de autenticidade científica de um método de avaliação (Gorgatti e Bohme, 2003). Em se tratando de uma nova proposta de avaliação da potência propulsiva em usuários de cadeiras de rodas, faz-se necessário investigar a capacidade de repetição de qualquer processo ligado ao protótipo desenvolvido. Em nosso entendimento, o método proposto e demonstrado na presente investigação possui vantagens importantes quando comparados a procedimentos anteriormente descritos. As principais características positivas do método são a não consideração de parâmetros de inércia (Devillard et al., 2001; Faupin et al., 2008), bem como a baixa complexidade dos procedimentos práticos (Shimada et al., 1995; DiGiovine et al., 2001).

Quando comparados aos modelos descritos por Devillard (2001), o procedimento proposto é calculado com base na quantidade de movimento rotacional exercido pelo cilindro após o deslocamento de uma massa conhecida. Sendo assim, a resistência ao movimento rotacional, representada pelo MI, é uma característica de suma importância quando analisadas variáveis de força ou potência, pois constitui-se em uma grandeza que interfere nos cálculos. A assunção de um modelo teórico do MI poderia superestimar os valores de PO determinados por este procedimento, já que tivemos valores de MI significativamente menores para o modelo teórico em comparação ao modelo experimental ($P<0,05$). Modelos de equipamentos que utilizam modelos teóricos têm, muitas vezes, que utilizar recursos de correção para essas distorções, muitas vezes baseadas no peso do sujeito.

Por outro lado, a consideração de parâmetros mecânicos relacionados à própria cadeira de rodas do sujeito serviria para verificar mudanças consideráveis na fisiologia dos avaliados (Mason et al., 2001; Bhambhani et al., 1991; Bhambhani et al., 1992). Neste caso, sujeitos que utilizassem cadeiras de rodas diferentes poderiam ser classificados de uma mesma maneira, contudo, possuírem ergonomia (Woude et al., 1986) de movimento e eficiência mecânica (Woude et al., 1997) distintas e não detectadas por esses modelos. Acreditamos que a melhor forma de controlar essas alterações no tipo de cadeira, juntamente a estratégia utilizada pelo sujeito no momento da propulsão. Acreditamos que uma das melhores maneiras de realizar essa diferenciação é termos um equipamento devidamente calibrado, com suas propriedades inerciais conhecidas para, a partir da testagem dos sujeitos nos seus próprios instrumentos de locomoção, traçar parâmetros a partir da energia e da potência gerada sob diversas condições. A consideração de características da cadeira e dos sujeitos (com exceção da massa de ambos), nos modelos matemáticos poderiam negligenciar a interação existente no binômio (usuário+cadeira de rodas), que sofrem influência da estratégia (Lenton et al., 2009) de propulsão, do padrão de propulsão (Boninger et al., 2002), frequência de impulsos (Vanlandevicjk et al., 1994) e da ergonomia da cadeira (Mason et al., 2011; Sagawa Jr. et al., 2010).

O procedimento de incremento de cargas revelou diferenças nos valores de MI para todas as massas conhecidas. Este achado revela a relação existente entre a transmissão da energia cinética no sistema de calibração, o que constitui uma característica comum em sistemas de transmissão de forças. Após as análises realizadas no presente estudo recomenda-se utilizar, nos testes de esforço posteriores, um valor fixo de MI, para que seja o valor de calibração e correção de possíveis diferenças que venham a ocorrer decorrentes da utilização do DINACOM e dos níveis de lubrificação dos cilindros de instrumentação. Sendo assim, recomendamos utilizar o valor de 0,014kg·m², obtido com a massa de calibração de 0,240kg, visto que se configura numa grandeza que facilita os cálculos matemáticos além de apresentar desvio-padrão de 0,000 em todas as sessões de reprodutibilidade.

CONCLUSÃO

Com base nas análises realizadas verifica-se que o método de calibração possui autenticidade científica quanto aos critérios de reprodutibilidade e aplicabilidade, quando comparados aos modelos teóricos para calculo do momento de inércia, constituindo-se em um procedimento simples e de fácil administração na prática da intervenção em condicionamento físico e avaliação do desempenho em usuários de cadeiras de rodas.

REFERÊNCIAS

Bhambhani Y, Eriksson P, Steadward R. Reliability of peak physiological responses during wheelchair ergometry in persons with spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil.* 1991;72(8):559-562.

Bhambhani Y, Holland L, Steadward R. Maximal aerobic power in cerebral palsied wheelchair athletes: validity and reliability. *Archives of physical medicine and rehabilitation.* 1992;73(3):246.

Boninger ML, Souza AL, Cooper RA, Fitzgerald SG, Koontz AM, Fay BT. Propulsion patterns and pushrim biomechanics in manual wheelchair propulsion. *Archives of physical medicine and rehabilitation.* 2002;83(5):718-723.

Devillard X, Calmels P, Sauvignet B, *et al.*. Validation of a new ergometer adapted to all types of manual wheelchair. *European journal of applied physiology.* 2001;85(5):479-485.

DiGiovine CP, Cooper RA, Boninger MA. Dynamic calibration of a wheelchair dynamometer. *Development.* 2001;38(1):41-55.

Faupin A, Gorce P, Thevenon A. A wheelchair ergometer adaptable to the rear-wheel camber. *International Journal of Industrial Ergonomics.* 2008;38(7-8):601-607.

Finley MA, Rodgers MM, Rasch EK, McQuade KJ, Keyser RE. Reliability of biomechanical variables during wheelchair ergometry testing. *Journal of Rehabilitation Research and Development.* 2002;39(1):73-82.

Gorgatti MG, BÖHME MTS. Autenticidade científica de um teste de agilidade para indivíduos em cadeira de rodas. *Revista Paulista de Educação Física.* 2003;17(1):41-50.

Hall SJ, Taranto G. *Biomecânica básica*: Guanabara Koogan; 2000.

Lenton J, van der Woude L, Fowler NE, Goosey-Tolfrey VL. Effects of arm frequency during synchronous and asynchronous wheelchair propulsion on efficiency. *Int J Sports Med.* 2009;30(4):233-239.

Mason B, Van Der Woude L, De Groot S, Goosey-Tolfrey V. Effects of Camber on the Ergonomics of Propulsion in Wheelchair Athletes. *Medicine & Science in Sports & Exercise.* 2011;43(2):319.

Niesing R, Eijskoot F, Kranse R, *et al.*. Computer-controlled wheelchair ergometer. *Medical and biological engineering and computing.* 1990;28(4):329-338.

Okuno E, Fratin L. *Desvendando a física do corpo humano: biomecânica*: Manole; 2003.

Oliveira, S., Freitas, F., Rodrigues, W., Oliveira, L. I., Bione, A., Brito-Gomes, J., ... & Costa, M.. Heart rate and perceived exertion responses to protocol incremental speed dynamometry for wheelchairs. *Journal of Physical Education*, 2017;28(1):1-10

Pupo HC, Ziemath EC. Determinação do momento de inércia de um volante usando um faiscador. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física.* 2009;19(1).

Sagawa Jr Y, Watelain E, Lepoutre FX, Thevenon A. Effects of Wheelchair Mass on the Physiologic Responses, Perception of Exertion, and Performance During Various Simulated Daily Tasks. *Archives of physical medicine and rehabilitation.* 2010;91(8):1248-1254.

Sauret C, Bascou J, de Saint Rémy N, Pillet H, Vaslin P, Lavaste F. Assessment of field rolling resistance of manual wheelchairs. *J Rehabil Res Dev.* 2012;49(1):63-74.

Shimada S, Cooper R, Lawrence B, Robertson R. Computer controlled wheelchair dynamometer1995.

Theisen D, Francaux M, Fayt A, Sturbois X. A new procedure to determine external power output during handrim wheelchair propulsion on a roller ergometer: a reliability study. *International journal of sports medicine.* 1996;17(8):564-571.

Van der Woude L, De Groot G, Hollander A, van Ingen Schenau G, Rozendal R. Wheelchair ergonomics and physiological testing of prototypes. *Ergonomics.* 1986;29(12):1561-1573.

Van der Woude LHV, Botden E, Vriend I, Veeger D. Mechanical advantage in wheelchair lever propulsion: effect on physical strain and efficiency. *Development.* 1997;34(3):286-294.

Vanlandewijck YC, SPAEPEN AJ, LYSENS RJ. Wheelchair propulsion efficiency: movement pattern adaptations to speed changes. *Medicine & Science in Sports & Exercise.* 1994;26(11):1373.

MINIBIOGRAFIA



Saulo Fernandes Melo de Oliveira (saulo.fernandesmelo@ufpe.br)
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4402-1984

Tem experiência na área de Educação Física e Desempenho Humano, com ênfase em atividade física adaptada, educação física adaptada, pessoas com deficiência e esporte paralímpico, atuando principalmente nos seguintes temas: avaliação do desempenho físico e esportivo, testes de esforço, capacidade de propulsão manual em cadeiras de rodas, biomecânica, cineantropometria, medidas e avaliação física. Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/1370555928023240



Afonso Augusto Guimarães Bione (afonso@recife.pe.gov.br)
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3475-0582

Possui experiência com informática, manutenção e desenvolvimento de tecnologias para a saúde e qualidade de vida.
Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/1340900886642061



Lúcia Inês Guedes Leite de Oliveira (inesgloliveira@gmail.com)
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5515-677X

Graduada em educação física, possui experiência nos seguintes temas: pessoas com deficiência, esporte e inclusão, esporte adaptado, bocha paralímpica, biomecânica e avaliação física. Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/7429509025432143



Manoel da Cunha Costa (manoel.costa@upe.br)
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8815-8846

Possui experiência na área de Educação Física/Ciências do Desporto, com ênfase em Ciências Biológicas/Ciências da saúde, atuando principalmente no desenvolvimento e aperfeiçoamento de Tecnologia (equipamentos e processos) na avaliação do Desempenho Humano.
Currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/5490469587516115