

DESENVOLVIMENTO DE UM EXOESQUELETO MODULAR PARA MEMBROS INFERIORES

WILIAN M. DOS SANTOS, GUSTAVO C. DE OLIVEIRA, ADRIANO A. G. SIQUEIRA

*Laboratório de Reabilitação Robótica, Departamento de Engenharia Mecânica,
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo*

Av. Trabalhador São-carlense, 400. Parque Arnold Schmidt, CEP 13566-590, São Carlos, SP

E-mails: wiliamds@yahoo.com.br, gcapalbo@hotmail.com, siqueira@sc.usp.br

Abstract — This present work aims to develop a mechanism to assist in the treatment of patients with compromised movements of the lower limbs. The exoskeletons currently are tools developed by the engineering field with important role in physical therapy medical field, and the main focus of the use of such tools in the motor rehabilitation is faster in relearning, causing the patient to learn the correct move in a more quick and efficient. The developing device consists of tubular low-weight structures and the coupling between the links and the mounting brackets that provide a modular feature of the system. This feature allows the exoskeleton to be adapted to assist the movement of one or more joints of the patient. The performance of the exoskeleton is also modular and can be performed passively by means of springs and shock absorbers, or actively by actuators, especially elastic actuators in series.

Keywords — Exoskeleton, rehabilitation robotics, rehabilitation of walking, lower limbs.

Resumo — O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um mecanismo capaz de auxiliar o tratamento de pacientes com movimentos dos membros inferiores comprometidos. Os exoesqueletos atualmente são ferramentas desenvolvidas pelo campo da engenharia com importante atuação na área médica fisioterápica, sendo que o principal enfoque da utilização de tais ferramentas na reabilitação motora é a maior rapidez no reaprendizado, fazendo com que o paciente aprenda o movimento correto de forma mais rápida e eficiente. O dispositivo em desenvolvimento é composto por estruturas tubulares de baixo peso e acoplamentos entre os elos e os suportes de fixação que fornecem uma característica modular ao sistema. Tal característica permite que o exoesqueleto seja adaptado para auxiliar o movimento de uma ou mais articulações do paciente. A atuação do exoesqueleto também é modular, podendo ser realizada de forma passiva, por meio de molas e amortecedores, ou de forma ativa através de atuadores, em especial atuadores elásticos em série.

Palavras-chave — Exoesqueleto, Reabilitação robótica, Reabilitação do caminhar, Membros inferiores.

1. Introdução

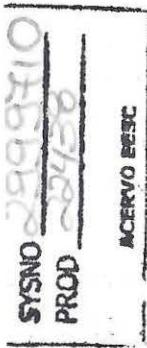
Traumas causados por acidentes que atingem o sistema neural (cabeça e coluna) implicam em consequências como o comprometimento de funções motoras, como por exemplo, o caminhar. É sabido da medicina que tratamentos organizados em sessões, que buscam o reaprendizado dos movimentos comprometidos após o trauma sofrido, possuem eficiência comprovada, tendo como principal ferramenta a repetição.

Na intenção de auxiliar os tratamentos fisioterápicos de pacientes que passaram por traumas, os quais comprometem movimentos essenciais para o bem-estar social, a reabilitação robótica surge como alternativa de introdução de ferramentas tecnológicas em tratamentos ministrados por fisioterapeutas. Tendo como principal objetivo o aumento do rendimento de um tratamento fisioterápico e, consequentemente, uma evolução mais rápida na recuperação de movimentos pelo paciente, a reabilitação robótica utiliza os estudos da mecânica dos movimentos, da modelagem de sistemas dinâmicos e o uso de novas tecnologias, criando uma nova interação entre as ciências exatas e as biológicas.

O objetivo aqui é produzir um exoesqueleto para membros inferiores usado na reabilitação motora de pacientes durante sessões de fisioterapia.

As órteses ativas ou exoesqueletos para assistência ao caminhar de pessoas com deficiência são atualmente compostos por estruturas mecânicas de elevado peso e volume. Como exemplo mais recente, podemos destacar o exoesqueleto desenvolvido pelo pesquisador Miguel Nicolelis e exibido durante a abertura da Copa do Mundo de Futebol de 2014, no Brasil.

Recentemente, a FDA (*Food and Drug Administration*), agência americana que regulamenta medicamentos e alimentos, aprovou a comercialização do ReWalk, exoesqueleto da empresa Argo Medical Technologies (Esquenazi, 2012). O equipamento possibilita a paraplégicos caminhar com a ajuda de muletas e acompanhantes. O acionamento deste tipo de dispositivo comercial é realizado através de comandos fornecidos através de botões e pela detecção da inclinação do torso por meio de unidades de medida inercial. Estes comandos disparam movimentos simples, tais como executar uma passada ou uma sequência repetitiva de passos. Desta forma, o usuário deve intervir frequentemente para poder se locomover, executando comandos que resultam em movimentos simples.



Por outro lado, dispositivos mais leves e compactos vêm sendo desenvolvidos e estudados pelos principais grupos de pesquisa do mundo. O Soft Exosuit desenvolvido no *Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering* da Universidade de Harvard, com apoio da DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*), é um destes (Ding, 2014). Este dispositivo é acionado por meio de cabos de aço provenientes de motores localizados na parte posterior do usuário, realizando um movimento coordenado das juntas do quadril, joelho e tornozelo. Entretanto, como a sustentação do usuário e do próprio equipamento é realizada por uma veste contendo um número limitado de partes metálicas, este exoesqueleto não pode ser utilizado por pessoas com alto nível de deficiência, por exemplo, indivíduos com lesão medular completa. Esta solução foi proposta para ser utilizada por pessoas saudáveis, em especial soldados, ou com deficiências neurológicas leves.

Outro projeto coordenado pela University Hospital Balgrist e pela University of Zurich na Suíça (Bartebach, 2015) busca uma solução para a reabilitação motora visando conceitos como a transparência, a generalidade e modularidade do dispositivo, conceitos muito próximos dos idealizados para o atual projeto.

Neste trabalho é proposto um exoesqueleto para membros inferiores que apresenta características modulares tanto na possibilidade de se trabalhar uma ou mais articulações do paciente quanto na forma de acionamento das juntas do sistema robótico.

O artigo é organizado como se segue: na Seção 2 são apresentados os requisitos de projeto; na Seção 3 é apresentado o projeto mecânico das partes que compõem o sistema; na Seção 4 são avaliadas as possibilidades de atuação do exoesqueleto e apresentado um modelo de atuador elástico em série; na Seção 5 são apresentadas as conclusões e discussões.

2. Requisitos de projeto

Para o projeto do exoesqueleto foram definidos alguns requisitos de projeto que lhe fornecessem os adjetivos de universal, modular e transparente para o paciente.

2.1 Dispositivo universal

É de fundamental importância que o exoesqueleto a ser produzido possa ser usado pelo maior número de pacientes. Assim, o número de ajustes a serem feitos ao se trocar de paciente deve ser pequeno. Esse requisito busca reduzir os custos dos tratamentos auxiliados pelo exoesqueleto, pois um dispositivo pode ser usado por mais de um paciente.

2.2 Exoesqueleto transparente

Por se tratar de um dispositivo que será vestido pelo paciente, é importante se atentar à interferência que esse terá sobre os movimentos do paciente. O objetivo é estruturar a realização do caminhar com o mínimo de restrição a outros movimentos e sem dificultar a movimentação quando o paciente vestir o exoesqueleto.

2.3 Sustentação estrutural

A estrutura física do dispositivo deve ser rígida o suficiente para não sofrer deformações plásticas ao receber esforços provenientes dos atuadores e também do paciente.

2.4 Juntas e atuadores independentes

Importante ponto a ser observado no projeto do exoesqueleto é a independência entre as juntas e os atuadores, o que significa existir um sistema de acoplamento entre ambos. Essa característica tem por objetivo ter-se a decisão de usar uma junta do exoesqueleto como junta ativa, transmitindo torque para o paciente, ou uma junta passiva, sem a presença do atuador, porém com possibilidade de se utilizar um elemento passivo, como mola e amortecedor.

2.5 Exoesqueleto modular

Foi observado, analisando tratamentos realizados por fisioterapeutas, que em alguns casos são feitos tratamentos pontuais nas articulações, nem sempre todas as juntas são tratadas ao mesmo tempo. Embasado nisso, é importante desenvolver um exoesqueleto modular, sendo possível retirar as juntas que não serão usadas durante o tratamento ou deixá-las atuarem de forma passiva, guiadas pelos movimentos do paciente.

2.6 Desalinhamento entre membros e dispositivo

Em muitos casos, considerando o movimento do caminhar natural de um paciente saudável e o possível movimento de um exoesqueleto, verifica-se um desalinhamento entre as articulações do paciente e as juntas do exoesqueleto. Tal desalinhamento não interfere na dinâmica do reaprendizado do andar, mas interfere na naturalidade do movimento. Assim, o exoesqueleto projetado deve ter mecanismos para compensar tais desalinhamentos, trazendo mais naturalidade ao movimento aprendido.

2.7 Ângulos realizados pelas juntas

O intuito é que o paciente realize alguns movimentos básicos usando o exoesqueleto como o caminhar, subir e descer escadas, sentar e levantar-se. A Tabela 1 mostra os ângulos mínimos e máximos realizados pelas articulações dos membros inferiores ao

se realizar tais movimentos retirados das referências Riener, 2002 e Roebroeek, 1994.

Tabela 1: Ângulos das articulações para diferentes movimentos.

Movimento	Quadril	Joelho	Tornozelo
Andar	-10°/25°	10°/60°	-15°/10°
Subir escadas	15°/70°	10°/95°	-20°/15°
Descer escadas	20°/45°	15°/90°	-25°/15°
Sentar e Levantar	-10°/90°	10°/105°	10°/25°

3. Projeto Mecânico

Buscando suprir todos os requisitos de projeto, as peças que compõem o exoesqueleto foram projetadas e divididas conforme a parte do corpo em que estarão em contato. Tais peças estão descritas nessa seção.

3.1 Quadris

Na região dos quadris foram priorizadas três funções, listadas abaixo:

- Fornecer sustentação ao exoesqueleto através de um sistema de suporte do dispositivo ao tronco do paciente.
- Um mecanismo que possibilite os movimentos de adução/abdução da articulação do quadril.
- Dispositivo ajustável a diferentes pacientes.

A sustentação entre o exoesqueleto e o tronco do paciente é feita através de uma peça composta por um rolamento linear, a qual será fixada a uma abraçadeira que envolverá o tronco do paciente na região dorsal. Aqui é usado um rolamento linear para permitir a movimentação do tronco em relação ao exoesqueleto diminuindo a restrição dos movimentos derivados do caminhar como solução do requisito de projeto 2.6. O sistema de fixação está ilustrado na Figura 1 e a peça com rolamento linear na Figura 2. Em todas as figuras, as dimensões estão em milímetros.

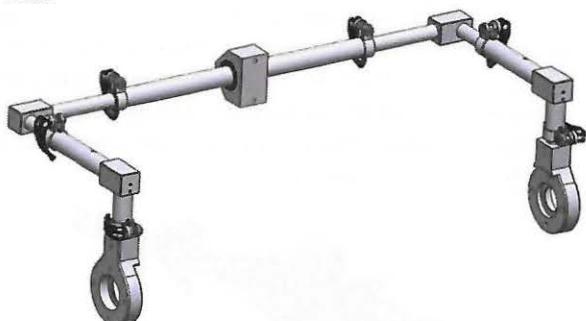


Figura 1: Sistema de fixação do tronco.

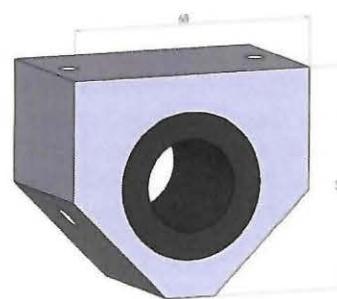


Figura 2: Peça composta por rolamento linear.

A respeito do movimento de abdução dos membros inferiores, existem mecanismos instalados no interior dos elos laterais dos quadris responsáveis por permitirem pequenos movimentos de abdução. Os mecanismos são compostos por pequenos eixos e molas de torção como visto na Figura 3.

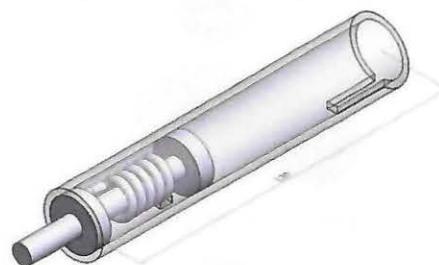


Figura 3: Mecanismo de adução/abdução do quadril.

A possibilidade de ajustes nas medidas dos elos é possível graças a um sistema tipo macho e fêmea usando tubos redondos e abraçadeiras conhecidas como *seat-clamp* para a fixação, Figura 4. O sistema descrito é amplamente usado na fixação de tubos e foi escolhido com inspiração nos sistemas de fixação entre canotes e quadros de bicicletas, tendo como características mais interessantes o ajuste rápido e a possibilidade de receber grande carga axial.

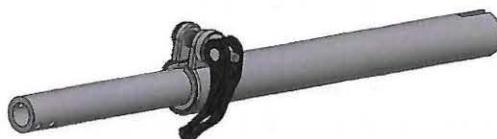


Figura 4: Sistema de união entre elos.

3.2 Juntas

As juntas que simulam o movimento das articulações dos membros inferiores foram projetadas pensando na independência entre juntas e atuadores (requisito de projeto 2.4). A junta propriamente dita é formada de duas peças, uma fixa, onde o atuador será fixado e outra móvel, a qual o atuador moverá. As duas peças são ligadas por dois rolamentos de esferas.

A peça fixa apresenta quatro furos, os quais servirão para a fixação do atuador, um furo central por onde passará o eixo do atuador e rebaixos os quais acomodarão os rolamentos de esferas. Por sua vez, a

peça móvel apresenta um rasgo chanfrado para acomodação do eixo do atuador, quatro furos para passagem dos parafusos responsáveis pela fixação do atuador à peça fixa. Esta peça também possui uma fragilização para a colocação de extensômetros, dispositivos usados para medir as deformações da peça e as forças aplicadas ao dispositivo.

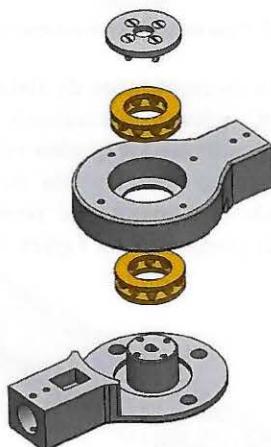


Figura 5: Vista explodida da junta.

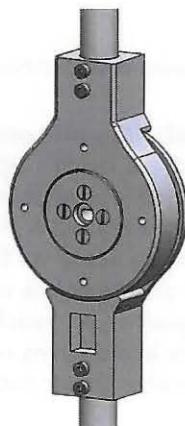


Figura 6: Montagem da junta.

Na vista explodida, Figura 5, e na montagem da junta, Figura 6, é mostrada uma tampa circular parafusada na peça móvel com a função de restringir os movimentos laterais dos rolamentos de esferas.

As juntas foram projetadas para superar os intervalos de ângulos listados na Tabela 1 e assim atender o requisito de projeto 2.7, porém mecanismos com função de restringir tais intervalos serão desenvolvidos com a intenção de proporcionar maior segurança.

3.3 Elos

Os elos que fazem a união entre as juntas têm papel importante no requisito de que o exoesqueleto a ser desenvolvido possa ser usado por mais de um paciente. Sendo assim, os elos foram projetados pensando em um sistema de ajustes de altura que pudesse atender um grande número de pacientes.

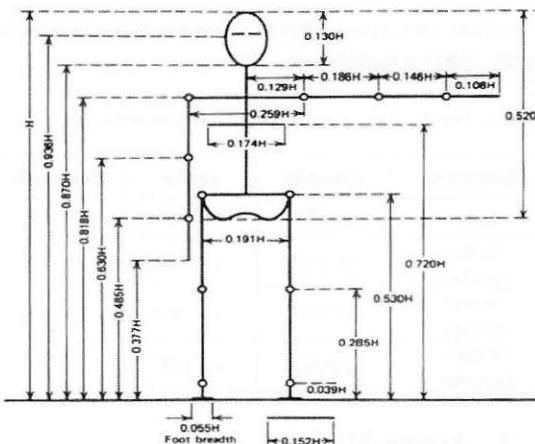


Figura 7: Antropometria, retirado de Winter, 1990.

Com o objetivo de satisfazer o requisito de projeto 2.1, fez-se o dimensionamento dos elos usando o conceito de Antropometria, impondo que a altura do paciente pode variar entre 1,65 m e 1,90 m. A técnica de Antropometria é muito utilizada para prever o dimensionamento de peças a serem acopladas ao corpo humano. A Figura 7 mostra os valores utilizados para se definir os tamanhos dos elos do exoesqueleto em função da altura dos pacientes (Winter, 1990).

A dinâmica de funcionamentos dos elos, como já dito, é baseado no sistema macho e fêmea e na fixação através das abraçadeiras *seat-clamp* visando à flexibilidade de ajustes e a sustentação do paciente.

Os elos machos são tubos redondos de $\frac{3}{4}$ de polegadas com parede de $\frac{1}{8}$ de polegada e possuem dois furos passantes em uma de suas extremidades para a fixação nas juntas, Figura 8.



Figura 8: Elos fêmea e macho.

Os elos do tipo fêmea são tubos redondos de 1 polegada com parede de $\frac{1}{8}$ de polegada e possuem rasgos em ambas as extremidades para a colocação do *seat-clamp*.

No elo do tipo fêmea deslizará uma peça com um rolamento linear acoplado que fará a ligação entre os elos e uma abraçadeira que revestirá a perna do paciente. O rolamento linear tem a função de permitir um leve desalinhamento entre o exoesqueleto e o membro inferior do paciente.



Figura 9: Montagem dos elos.

As dimensões dos elos variam de acordo com a posição que eles ocupam no exoesqueleto, porém todas as medidas são baseadas na Antropometria para pacientes entre 1,65 e 1,90 metros de altura.

3.4 Pés

O sistema de fixação entre o exoesqueleto e os pés do paciente é feito por um par de sapatos personalizados conectados às juntas dos tornozelos.

Entre a junta do tornozelo e o sapato a ser calçado pelo paciente existe um pequeno ajuste de altura usando o mesmo sistema macho e fêmea dos elos maiores.

Os sapatos usados possuem placas de metal internas aos solados e espaços para a futura colocação de sensores de força que medem a interação entre o pé do paciente e o solo durante o caminhar. Nas Figuras 10 e 11, os sapatos a serem usados pelo paciente estão omitidos, mostrando apenas as placas de metal que serão internas à sola dos sapatos.

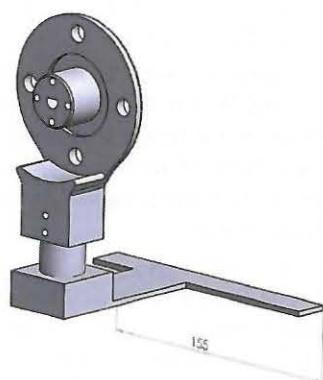


Figura 10: Montagem sistema de fixação do pé direito.

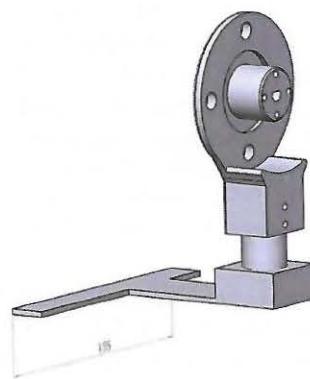


Figura 11: Montagem sistema de fixação do pé esquerdo.

3.5 Abraçadeiras

As abraçadeiras têm a função de conectar os elos do exoesqueleto ao corpo do paciente. A configuração escolhida por perna foi de uma abraçadeira na altura da coxa (abraçadeira superior) do paciente e outra na altura da panturrilha (abraçadeira inferior).

As abraçadeiras, feitas de material polimérico, são fixas a uma unidade de rolamento linear, mostrada na Figura 9, que permitirá a rotação em torno do

eixo axial do elo e a translação também na direção axial do elo.

Também existirá uma peça de fixação similar nos quadris fazendo a conexão entre o exoesqueleto e a lombar do paciente.

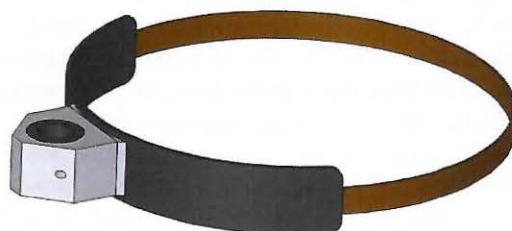


Figura 12: Abraçadeira de fixação superior.

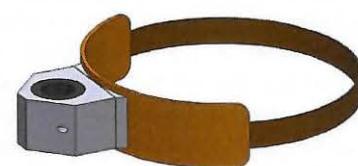


Figura 13: Abraçadeira de fixação inferior.

3.6 Montagem Final

A Figura 14 mostra a montagem final do exoesqueleto de membros inferiores, considerando a sua atuação em todas as articulações das pernas no plano sagital.

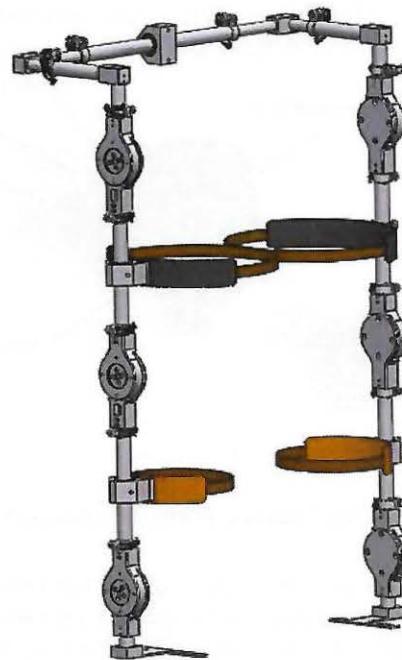


Figura 14: Exoesqueleto montado.

4. Atuadores

Umas das principais características do exoesqueleto proposto neste trabalho é a sua modularidade com relação ao tipo de acionamento de suas juntas. Tal característica é possível, pois a ligação entre os elos é feita por juntas independentes, o que geralmen-

te não é encontrado nos demais exoesqueletos já propostos.

Desta forma, o exoesqueleto pode ser acionado tanto por um dispositivo passivo quanto por um atuador ativo. No caso passivo, pode-se acoplar à junta, por meio de um dispositivo fixado a ela, um conjunto de mola e amortecedor que introduza certa resistência ao movimento. Ou, no caso de se utilizar algum mecanismo de bloqueio e desbloqueio da mola, armazenar energia na mola e liberá-la quando necessário.

Com relação à atuação ativa, sistemas robóticos destinados a ter contato direto com seres humanos, sendo o caso dos exoesqueletos e robôs de reabilitação, devem possuir mecanismos que garantam uma interação estável e complacente com o usuário. Na referência Robinson, 1999 foi proposta uma configuração de atuador que consiste na inclusão de uma mola entre a saída do redutor e a carga, denominado Atuador Elástico em Série - AES. A mola pode ser utilizada para determinar a força aplicada, e assim, realizar controle de força ou impedância, garantindo a estabilidade e complacência requerida.

No âmbito deste projeto é proposto um atuador elástico em série rotacional para a atuação das juntas. O equipamento proposto é constituído de um motor de corrente contínua (Maxon motor EC 90 flat), um redutor de velocidade do tipo Harmonic-Drive (1:50) e, como elemento elástico, uma mola torcional customizada, projetada e construída utilizando técnicas baseadas no método de elementos finitos (Santos, 2014). A Figura 15 mostra a vista explodida do atuador elástico em série proposto.

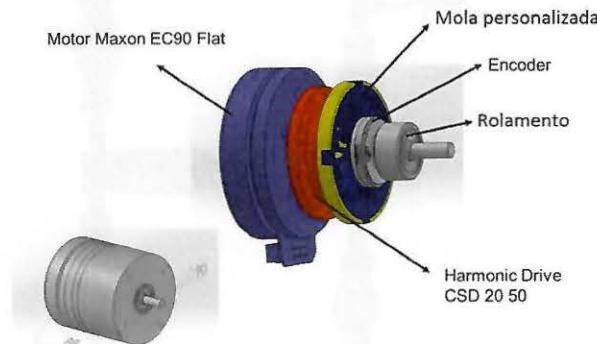


Figura 15: Atuador elástico em série.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

As pesquisas em relação à funcionalidade e à eficiência do tratamento usando exoesqueletos de membros inferiores ainda não são conclusivas, o que justifica o estudo de novos dispositivos e soluções construtivas, além do desenvolvimento de atuadores apropriados para o controle da interação entre paciente e exoesqueleto.

Como atividades a serem realizadas estão: a usinagem das peças, a montagem do exoesqueleto e testes com pacientes visando a analisar o comportamento dos dispositivos projetados ao receber esforços e a observação da funcionalidade do dispositivo.

Também serão avaliados os sensores e atuadores a serem acoplados ao exoesqueleto, em especial, o atuador elástico em série, os extensômetros e os sensores de contato com o solo.

Agradecimentos

Esse trabalho é apoiado pelo Programa Unificado de Bolsas da USP, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP (processo no. 2013/14756-0) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Programa de Apoio à Pós-Graduação e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Tecnologia Assistiva no Brasil (PGPTA), auxílio no. 3457/2014.

Referências Bibliográficas

- Bartenbach, V.; Wyss, D.; Seuret, D. e Riener, R. (2015). "A lower limb exoskeleton research platform to investigate human-robot interaction." In *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2015 IEEE International Conference on*. IEEE.
- Ding, Y.; Galiana, I.; Asbeck, A.; Quinlivan, B.; De Rossi, S. and Walsh, C. (2014). Multi-joint Actuation Platform for Lower Extremity Soft Exosuits, In: *Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. Hong Kong, China.
- Esquenazi, A.; Talaty, M.; Packel, A. e Saulino, M. (2012). The ReWalk Powered Exoskeleton to Restore Ambulatory Function to Individuals with Thoracic-Level Motor-Complete Spinal Cord Injury. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, Volume 91 - Issue 11 - p 911-921.
- Riener, R.; Rabuffetti, M. e Frigo, C. (2002). "Stair ascent and descent at different inclinations," *Gait & posture*, vol 15, no. 1, pp. 32-44.
- Robinson, D. W.; Pratt, J.; Paluska, D.; Pratt, G. (1999). Series Elastic Actuator Development for a Biomimetic Walking Robot, In: *Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Atlanta, USA.
- Roebroeck, M.; Doorenbosch, C.; Harlaar, J.; Jacobs, R. e Lankhorst, G. (1994). "Biomechanics and muscular activity during sit-to-stand transfer," *Clinical Biomechanics*, vol. 9, no. 4, pp. 235-244.
- Santos, W. M.; Siqueira, A. A. G. (2014). Impedance Control of a Rotary Series Elastic Actuator for Knee Rehabilitation In: *19th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, 2014, Cape Town.
- Winter, D. (1990). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement* – Second edition.