

ESTADO DA ARTE EM REABILITAÇÃO ROBÓTICA DE MEMBROS INFERIORES DE PESSOAS COM AVE

Ana Carolina Barbosa Faria Gonçalves – Faculdade Anhanguera de Bauru - Unidade Norte

Adriano Almeida Gonçalves Siqueira – Universidade de São Paulo - EESC/USP

RESUMO: As doenças cerebrovasculares, incluindo o acidente vascular encefálico, são a segunda causa de morte no mundo, e o principal causador das incapacidades em adultos. Novos tratamentos são desenvolvidos para enfrentar os desafios da reabilitação, entre eles a reabilitação robótica. O presente trabalho propõe uma revisão bibliográfica, de dispositivos robóticos de reabilitação do tornozelo já desenvolvidos no exterior e apresenta um projeto de pesquisa nacional, a Plataforma Robótica de Reabilitação de Tornozelo – PRRT, desenvolvida no Laboratório de Mecatrônica da Escola de Engenharia de São Carlos, que será testada em indivíduos hemiparéticos e em seguida será verificada a adequação e usabilidade do equipamento. Os dispositivos robóticos possibilitam a reabilitação de forma controlada e confiável, para facilitar a reorganização cortical. Observamos que inovações tecnológicas, como robótica e realidade virtual, aplicadas à reabilitação do tornozelo hemiparético promovem aumento de velocidade da marcha, ganho de força muscular e amplitude de movimento.

ABSTRACT: Cerebrovascular diseases, including stroke encephalic, are the second leading cause of death worldwide and the leading cause of disability in adults. New treatments are developed to meet the challenges of rehabilitation, including rehabilitation robotics. This paper proposes a literature review of robotic devices for rehabilitation of ankle already developed abroad and provides a national research project, the Platform Ankle Rehabilitation Robotics - PRRT, developed at the Laboratory of Mechatronics Engineering School of São Carlos, that will be tested in hemiparetic and then will be checked the suitability and usability of the equipment. The robotic devices allow rehabilitation in a controlled and reliable to facilitate cortical reorganization. We observed that technological innovations such as robotics and virtual reality applied to rehabilitation of hemiparetic ankle promote increased walking speed, gain muscle strength and range of motion.

PALAVRAS-CHAVE:

AVE, Reabilitação robótica e virtual de tornozelo.

KEYWORDS:

Stroke, Ankle Robotic and Virtual Rehabilitation.

Revisão de Literatura

Recebido em: 16/01/2013

Avaliado em: 28/03/2013

Publicado em: 05/12/2014

Publicação

Anhanguera Educacional Ltda.

Coordenação

Instituto de Pesquisas Aplicadas e

Desenvolvimento Educacional - IPADE

Correspondência

Sistema Anhanguera de

Revistas Eletrônicas - SARE

rc.ipade@anhanguera.com

1. INTRODUÇÃO

O acidente vascular encefálico (AVE) é definido como a interrupção do fluxo sanguíneo cerebral causado por oclusão de uma artéria por um trombo ou placa de gordura (AVE isquêmico) ou pelo rompimento de uma artéria causando extravasamento de sangue no cérebro (AVE hemorrágico); com isso, áreas do cérebro deixam de receber sangue evoluindo para isquemia e morte cerebral (ALVES et al., 2009).

Considerado o maior causador de incapacidades em adultos, provoca conseqüências funcionais dos déficits primários neurológicos que, geralmente, predispõem aos sobreviventes um padrão de vida sedentário, com limitações individuais para as atividades de vida diárias (AVD's) e reserva cardiológica reduzida (SCHUSTER; SANI; DALBOSCO, 2007). É uma doença multifatorial que envolve diversos fatores de risco, como idade, sexo, fumo, hipertensão, entre outros, ocorre predominantemente em adultos de meia idade e idosos (SANTOS, 2010). Em virtude do risco da incidência aumentar conforme a idade foi divulgado no último censo brasileiro um crescimento expressivo da população com 65 anos ou mais, passando de 4,8% em 1991 para 5,9% em 2000 e 7,4% em 2010. Ou seja, o número de idosos no Brasil hoje, atinge cerca de 14 milhões (SIQUEIRA, 2011).

Nos Estados Unidos e na Europa há uma prevalência de 200 a 300 novos casos de AVE em cada 100.000 habitantes por ano, contabilizando atualmente no mundo, cerca de quarenta e nove milhões de indivíduos que sobreviveram ao AVE e que convivem com alguma seqüela ou incapacidade funcional (ARAÚJO, 2011). Em relação ao Brasil, a cada ano são registrados aproximadamente 90 mil óbitos por doenças cerebrovasculares. O Sistema Único de Saúde (SUS) registrou no ano de 2008 cerca de 200 mil internações por AVE, que resultaram em um custo de aproximadamente R\$ 270 milhões. Desse total, 33 mil casos evoluíram para óbito (ABRAMCZUK; VILLELA, 2009).

Os indivíduos que sobreviveram ao AVE apresentam uma série de déficits, tais como alterações no nível de consciência e comprometimento nas funções dos sentidos, motricidade, cognição, percepção e linguagem (ROMERO et al., 2008; OTTOBONI; FONTES; FUKUJIMA, 2002; LOPES et al., 2004; SCHUSTER; SANI; DALBOSCO, 2007), o que provoca déficits na capacidade funcional, na independência e na qualidade de vida dos indivíduos. As seqüelas irão variar de acordo com o local e a extensão da lesão, a quantidade de fluxo sanguíneo colateral e o tratamento inicial da fase aguda. Existe o surgimento de diferentes níveis de comprometimento que determinam a gravidade e individualidade dos déficits neurológicos de cada paciente (O'SULLIVAN; SCHMITZ, 2004).

Em relação à função motora, estão envolvidas a paralisia ou paresia dos músculos do lado do corpo contralaterais à lesão cerebral. A hemiplegia é a forma mais comum de paralisia, e envolve o membro superior e inferior de um lado do corpo, podendo incluir a face. A perda parcial da mobilidade é conhecida como hemiparesia (GREVE, 2007).

O controle motor é a capacidade de regular os mecanismos essenciais para o movimento, porém não significa apenas a ativação dos motoneurônios para desencadear a contração muscular, o sistema nervoso central (SNC) deve receber informações sobre a forma como está transcorrendo o movimento para poder corrigi-lo e adequá-lo às condições de cada momento. Este processo, responsável pela precisão do ato motor é denominado coordenação motora (MOURA et al., 2009). A presença de déficit do controle motor pode ser caracterizada por fraqueza muscular, alteração do tônus e movimentos estereotipados, que podem limitar as habilidades para realizar atividades como deambular, subir escadas e autocuidar-se.

Imediatamente após o AVE há perda do tônus muscular, referido como paralisia flácida, que se caracteriza por perda de movimento voluntário e ausência da espasticidade reflexa. Não há resistência quando se aplica alongamento na musculatura. Usualmente há pouco ou nenhum movimento voluntário durante este estágio que dura dias, horas ou semanas. O tônus muscular tende a aumentar gradualmente e a espasticidade a se instalar (TEIXEIRA-SALMELA et al., 2000). A espasticidade caracteriza-se pela dificuldade de se movimentar passivamente uma articulação devido à intensa contração dos músculos que normalmente a mobilizam, e pela tendência à volta imediata à posição inicial quando a força imposta é cessada, além da característica de velocidade dependente. Associa-se à exacerbação dos reflexos tendinosos, sendo uma das seqüelas mais comuns presentes nas lesões do SNC (SCHUSTER; SANT; DALBOSCO, 2007).

O processo de recuperação do desempenho motor pode acontecer de diferentes maneiras e nos três diferentes estágios após o evento. Inicialmente, nas primeiras quatro semanas ocorre a chamada recuperação espontânea, por meio da reabsorção do hematoma e resolução da diasquise (depressão funcional transitória). A longo prazo, a reparação acontece por meio da reorganização do sistema nervoso central, que pode ser subdividida em duas formas: “recuperação verdadeira” e estratégias de compensação.

Na chamada recuperação verdadeira, os músculos comprometidos pelo AVE retornam a sua função por meio da reorganização de partes não afetadas do córtex motor. Já nas estratégias de compensação, ocorre adaptação de outros grupos musculares para a realização de movimentos e tarefas antes realizadas por meio da ativação de músculos afetados pelo AVE. Em ambos os casos o processo de recuperação pode ser estimulado e moldado por programas de reabilitação que utilizem diferentes técnicas e exercícios para que ocorra o reaprendizado motor (ARAÚJO, 2011).

Para a recuperação plena é necessário a elaboração de programas de terapias físicas e ocupacionais individualizadas, tendo em vista que a reabilitação objetiva tornar hábil, aproveitar a capacidade máxima das funções de modo que permita o paciente se adaptar à vida em relação com o meio, conseguindo se possível, a integração das atividades de vida,

relação com a família e reintegração na sociedade (CANCELA, 2008). A reabilitação do AVE é um processo de reparação que visa promover a recuperação e para isso a fisioterapia e terapia ocupacional desempenham um importante papel. A motivação por trás da terapia é bem expressa pelas idéias da plasticidade ou neuroplasticidade do sistema nervoso, onde o cérebro humano é capaz de auto-reorganizar de modo que a aprendizagem oferece uma oportunidade de recuperação motora (ROY et al., 2009), ou seja, com a lesão encefálica ocorrem mortes nos neurônios, que devido a capacidade do cérebro de aprendizado e reestruturação, esses neurônios não são substituídos, e sim como resposta à reorganização funcional, há uma alteração nas sinapses, relacionada com a liberação de neurotransmissores que promovem a recuperação da lesão, tal fenômeno conhecido por neuroplasticidade (BORGES et al., 2007).

Observa-se um maior ganho na reabilitação nos primeiros três meses após o AVE, visto como período mais crítico. Melhorias após os 3 meses também podem ser observadas. Portanto, a reabilitação deve ser a mais rápida possível, visando a melhora das atividades de vida diária, melhorando a força muscular, reduzindo a espasticidade, aumentando o equilíbrio, melhorando a deambulação e reativando o lado afetado (SILVA, 2010). No entanto estudos recentes demonstraram que intervenções terapêuticas intensivas, como a terapia da restrição induzida do movimento, pode contribuir para uma redução significativa do comprometimento motor e promove melhora do uso funcional do membro superior afetado em indivíduos com mais de 1 ano de lesão após AVE, esta técnica se baseia na reorganização cortical (FASOLI et al., 2003) além desta, novos tratamentos e soluções tecnológicas foram desenvolvidas para enfrentar os desafios da reabilitação pós AVE: aumento da intensidade e duração da terapia incluindo manipulação externa; treinamento do movimento bilateral; e a reabilitação robótica.

Os dispositivos robóticos também possibilitam a realização de tarefas específicas repetidas vezes, de forma controlada e confiável, o que tem sido demonstrado na literatura como fator determinante para a facilitação da reorganização cortical, com concomitante aumento da habilidade motora e melhora do desempenho das atividades funcionais (ARAÚJO, 2011).

A aplicação de robôs em reabilitação data do início dos anos 90, porém o aumento de trabalhos nesta área nos últimos anos se deve à mudança de paradigma. De uma tecnologia assistiva para pessoas com deficiência para procedimentos baseados na terapia robótica, que utiliza a tecnologia para suportar e aumentar a produtividade e eficiência dos terapeutas visando a recuperação dos pacientes. Este aumento de produtividade e eficiência destaca-se como uma solução viável para o aumento do número de casos de AVE e o conseqüente aumento dos custos de tratamento (SIQUEIRA, 2011). Assim, a engenharia de reabilitação tem fornecido enfoque à utilização de equipamentos mecânicos e eletromecânicos para ajudar na recuperação de pacientes com deficiências motoras, é preciso que o paciente tenha interação com o robô, especificamente neste caso, determinado exoesqueleto, de forma que

o dispositivo forneça potência somente quando necessário, ou seja, o indivíduo é estimulado a treinar seus músculos e seus movimento de forma gradativa. Para que ocorra este tipo de interação são utilizados atuadores com rigidez controlável, para gerar movimentos antropomórficos e evitar lesões ao paciente e danos ao equipamento. Um exemplo de dispositivo que atua desta forma, são os atuadores elásticos em série que apresentam controle de força e impedância (possibilidade de impedância baixa), absorção de impactos, baixo atrito e largura de banda que se aproxima da movimentação muscular (JARDIM, 2009).

Diversos centros de pesquisa ao redor do mundo buscam adaptar ou reconfigurar robôs industriais para o uso em reabilitação, porém não é uma estratégia apropriada, pois a literatura mostra que impedâncias mecânicas baixas, comparáveis às dos seres humanos, não são atingidas com estes sistemas. Os robôs comerciais utilizam em baixo nível, o controle de posição, que não produz resultados satisfatórios quando forças de contato estão presentes. Controle de força por realimentação pode melhorar a resposta do robô, mas não é suficiente para gerar baixa impedância mecânica, necessária para mover de maneira suave e rápida o ponto de contato em conjunto com as ações do paciente (SIQUEIRA, 2011).

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica, por meio do levantamento de artigos internacionais que descrevem a elaboração, utilização e respostas obtidas do uso de dispositivos robóticos para reabilitação de tornozelo em indivíduos pós AVE, bem como apresentar um projeto de pesquisa em andamento, desenvolvido no Laboratório de Mecatrônica da Escola de Engenharia de São Carlos, o dispositivo robótico Plataforma Robótica de Reabilitação de Tornozelo - PRRT.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho propõe uma revisão bibliográfica, realizada por meio de pesquisa científica nas bases de dados: Compendex, Scopus e Web of Science, com base nas seguintes linhas teóricas dos autores, Blaya, J. A.; Herr, H.; Roy, A.; Krebs, H. I.; A pesquisa abrangeu o período de 2003 a 2011 e foi realizado um levantamento de dispositivos robóticos de reabilitação do tornozelo já desenvolvidos e em fase de pesquisa em indivíduos com deficiência motora e apresenta um projeto de pesquisa em desenvolvimento, pois até o momento estes dispositivos eram fabricados no exterior, e agora surge uma tecnologia nacional, a Plataforma Robótica de Reabilitação de Tornozelo - PRRT, desenvolvida no Laboratório de Mecatrônica da Escola de Engenharia de São Carlos, que será testada em indivíduos hemiparéticos e em seguida será verificada a adequação e usabilidade do equipamento a fim de realizar eventuais ajustes antes que o equipamento seja incorporado na prática clínica.

4. DESENVOLVIMENTO

Considerando que as doenças cerebrovasculares, incluindo o AVE, são a segunda maior causa de morte no mundo, responsável por 9,7% do total de óbitos em 2006, e o principal causador das incapacidades na população adulta. Cerca de 15 milhões de pessoas sofrem um AVE no mundo anualmente; dessas, 5 milhões evoluem a óbito e outros 5 milhões tornam-se incapacitadas, com alguma seqüela como dificuldade de locomover-se, distúrbios visuais e de linguagem, alterações de raciocínio e memória, tornando-se dependente de cuidados diários (ALVES et al., 2009). Tendo em vista o aumento de pesquisas na área de reabilitação robótica que comprovam melhorias tanto nos membros superiores como na e função dos membros inferiores após o tratamento intensivo em populações com seqüelas de AVE crônico ou subagudo (MIRELMAN, 2008).

A marcha eficiente pode ser dividida em cinco componentes principais: absorção da energia mecânica na fase de apoio inicial, promoção de apoio ao corpo, manutenção do equilíbrio postural, elevação do pé na fase de balanço, e geração de propulsão para promover a progressão do corpo à frente (SANTOS, 2010). Para garantir a eficiência da marcha ocorre uma regulação do momento angular em todo o corpo, com isso há prevenção de quedas e recuperação dos passeios. Os músculos do tornozelo são importantes nesta regulação do momento angular, Silverman e Neptune, 2011 descrevem que indivíduos com história de quedas apresentavam redução na saída dos flexores plantares, por exemplo, ao se recuperar da fase do balanço, apresentavam menor pico de dorsiflexão do tornozelo em relação ao movimento de flexão plantar, e as quedas ocorrem devido a baixa capacidade de limitar o movimento angular do corpo que se desloca à frente. Roy et al. 2009 acrescentam que o tornozelo desempenha importante papel na marcha em relação a “absorção de choque”, devido à colocação dos pés no solo. Estudos têm mostrado que as propriedades intrínsecas do tornozelo (por exemplo, rigidez) são modulados para acomodar as mudanças de superfície durante locomoção.

Em pacientes hemiparéticos, quando comparada à de adultos saudáveis, a marcha é caracterizada por diminuição da velocidade e assimetria temporal e espacial (FRANZOI; KAGOHARA, 2007). Nas alterações do controle motor a marcha é considerada deficiente, pois geralmente é descoordenada, arritmica, desequilibrada e com consumo elevado de valores energéticos. Especificamente no caso da hemiparesia, durante a fase de apoio, em virtude do pé equino, o contato inicial não é realizado pelo contato do calcâneo, e sim pelo antepé, surgindo geralmente, uma compensação em pronação da articulação subtalar (equinovaro), antes da elevação do calcâneo no apoio final. É comumente observada uma diminuição da plantiflexão do tornozelo na fase de apoio final, provocando diminuição da força propulsora, essas alterações são resultados da incapacidade dos músculos plantiflexores do tornozelo de produzir tensão suficiente no final da fase de apoio. Padrão característico no hemiparético,

o “pé caído”, causado pela fraqueza na musculatura dorsiflexora do tornozelo, este déficit provoca a batida do pé após o contato inicial do calcanhar (ROY et al., 2009).

Em relação à fase de balanço ocorre diminuição da dorsiflexão do tornozelo decorrente da incapacidade dos músculos dorsiflexores em produzir tensão suficiente em toda a fase de balanço e também devido à produção excessiva de tensão (espasticidade) ou encurtamento adaptativo dos plantiflexores em toda fase de balanço (OTTOBONI; FONTES; FUKUJIMA, 2002). Na fase de balanço há excesso de inversão e resulta em instabilidade no contato do dedo do pé no chão (ROY et al., 2009). O andar é assimétrico em relação ao tempo e à distância, um passo rápido com a perna sadia para evitar o apoio e o equilíbrio sobre a perna afetada, e evitando o padrão de espasticidade em extensão do quadril quando o pé hemiplégico está atrás (ROMERO et al., 2008; DAVIES, 1996).

A hemiparesia dos membros inferiores provoca redução na velocidade de caminhada e resistência, bem como alteração nos parâmetros da marcha, tais como comprimento do passo, duração e postura. A reabilitação tem demonstrado potencial significativo para melhorar a função motora e marcha. Modelos tradicionais de reabilitação da marcha muitas vezes empregam exercícios com tarefa orientada, como pisar e mudança de peso, bem como alongamento manual para aumentar a amplitude de movimento e treinamento de força. Estudos recentes têm mostrado que a prática de caminhada em esteira rolante pode melhorar o condicionamento cardiovascular e desempenho ambulatorial em indivíduos com marcha hemiparética, inclusive melhora da simetria entre os membros, cadência, e velocidade da marcha. Um relatório recente da Cochrane informou que juntamente com o treinamento em esteira, não há evidências que sugerem o treino de marcha eletromecânica pode melhorar a marcha independente (ROY et al., 2009).

As condições adversas financeiras e condições sociais levaram pesquisadores e empresários a explorar a viabilidade de robótica de reabilitação em acidente vascular encefálico. Segundo as estatísticas, após o AVE 37% dos sobreviventes são capazes de caminhar; dos que apresentam paralisia inicial, apenas 10% reconquistam independência funcional pós-AVE; os que não apresentam paralisia inicial, 25% não recuperam a capacidade de usar o membro inferior afetado e andar. Estas estatísticas alarmantes justificam a necessidade de dispositivos de reabilitação e técnicas eficazes em ajudar os pacientes a superar os efeitos maléficos do acidente vascular cerebral (WARD et al., 2010).

Roy et al. (2009) defendem que a neuroreabilitação assistida por robô tem um impacto positivo, reduzindo o comprometimento do AVE e auxilia na recuperação tanto na fase subaguda e como na crônica da lesão. Isto tem motivado o desenvolvimento de novos modelos projetados para a reabilitação dos movimentos antigravitacionais, principalmente do punho, mão e tornozelo. Os autores desenvolveram um dispositivo robótico para reabilitação do tornozelo, denominado Anklebot (*Interactive Motion Technologies, Watertown, MA*), ilustrado na Figura 1.



Fonte: Khanna et al. (2010).

Figura 1 - Anklebot, um robô projetado para auxiliar a terapia e avaliar a função do tornozelo de pacientes com alteração de marcha.

Neste primeiro estudo, Khanna et al. (2010) apresentam uma visão geral do projeto e caracterização de 3 graus de liberdade das extremidades inferiores do pé com relação à perna, sendo que dois deles são atuados por um par de atuadores lineares montados em paralelos, com baixo atrito e utiliza o controle de impedância para garantir que o sistema seja *backdriveable*, modelo robótico desenvolvido no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT).

O equipamento pesa em torno de 3,6 kg e permite amplitude de movimento articular normal pé durante o caminhar em uma esteira, ou sentado. O tornozelo do robô permite 25° de dorsiflexão, 45° de flexão plantar, 25° de inversão, 20° de eversão e 15° de rotação interna ou externa. Estes limites estão próximos da amplitude máxima de movimento confortável para indivíduos normais e também necessários para a marcha típica. Para este estudo, o objetivo do dispositivo era fornecer um torque complementar ao membro parético para amenizar os efeitos do pé caído, por meio da sinalização voluntária da função dos flexores plantares do tornozelo parético. O Anklebot permite auxiliar o paciente no final da fase de apoio, aplicando torque durante a flexão plantar necessária para dar impulso ao caminhar para retirar o pé do chão.

Primeiramente, a fim de verificar a precisão da estimativa dos ângulos do tornozelo no Anklebot, Roy et al. (2009) validaram o dispositivo pela comparação das medidas externas independentes. Para isto, construíram uma maquete do tornozelo humano, e várias rampas de acesso aplicados no pé da maquete. Em segundo, os autores avaliaram se a massa adicional unilateral altera significativamente a marcha. Realizaram testes com indivíduos saudáveis e hemiparéticos, solicitando andar sobre o solo em uma distância de 8m em uma velocidade confortável e auto-selecionada e também testes de caminhada na esteira. Como resultados os parâmetros espaço-temporais da marcha, como duração, postura e amplitude de movimento articular, não foram significativamente alterados devido à adição de massa unilateral, tanto em indivíduos saudáveis como em hemiparéticos.

Em terceiro, os autores realizaram uma abordagem simples para estimar a rigidez passiva estática do tornozelo usando o Anklebot e verificaram um alto potencial da sua

aplicação como uma ferramenta clínica de medição para estimar os parâmetros do tornozelo, como a rigidez passiva. Resultados preliminares já indicam que este dispositivo tem o potencial de evocar mudanças positivas em função de marcha (por exemplo, velocidade de caminhada), reduzir os danos (por exemplo, rigidez do tornozelo passiva), e melhorar medidas de controle do motor (por exemplo, a suavidade do movimento).

O Anklebot também foi testado por Ahn e Hogan, (2010) que verificaram a viabilidade do arrastamento dinâmico da locomoção humana com a perturbação mecânica do tornozelo. Foram avaliados, dezenove sujeitos saudáveis, que andaram em uma esteira com velocidade confortável, vestindo o Anklebot, sendo realizados apenas os movimentos do plano sagital. Antes de aplicar perturbações mecânicas periódicas, foi medida a duração da passada de cada sujeito. Durante o procedimento, o Anklebot foi programado para agir como uma mola de torção e com posição de equilíbrio constante do amortecedor. Como resultados, os autores verificaram que o arrastamento à perturbação mecânica periódica oferece suporte a uma nova estratégia para a reabilitação do aparelho locomotor que pode ter uma promessa: com base no desempenho de um paciente, um robô pode ser programado para desencadear frequência da marcha do paciente, e gradualmente “arrastar” para a frequência da marcha normal. Os resultados sugerem, que se o oscilador neural incorporado interagir com a mecânica dos músculo-esqueléticos periféricos desempenhará um papel proeminente na locomoção humana normal. Atualmente as terapias assistidas por robô são focadas no controle trajetórias dos membros e podem interferir com a execução normal da função locomotora. A terapia com o oscilador neural incorporado podem explorar a reabilitação explorando a dinâmica natural do caminhar.

Khanna et al. (2010) avaliaram a influência da adição de massa do dispositivo robótico Anklebot durante a marcha hemiparética. O estudo consistiu em examinar os efeitos do carregamento assimétrico ou unilateral do membro parético durante a terapia da marcha, inicialmente avaliaram os efeitos da inércia e fricção adicionada ao robô não motorizado, tanto no treinamento da marcha sobre o solo como sobre esteira. Foram selecionados dez sujeitos na fase crônica pós AVE. O peso do Anklebot 3,6kg com baixo atrito estático (< 1 Nm), neste estudo, o dispositivo de baixa impedância, permitia mobilidade na articulação do tornozelo nos três graus de liberdade, porém aciona apenas dois graus, a dorsiflexão / flexão plantar e inversão e eversão.

Foram realizadas duas sessões para evitar fadiga. A primeira sessão avaliou a capacidade em caminhar de forma independente sobre o solo e na esteira (com apoio das mãos). Na segunda sessão os sujeitos caminharam vestindo o Anklebot sem atuação robótica. A análise cinemática foi realizada utilizando um sistema de análise de movimento.

Com os resultados os autores verificaram que a montagem do Anklebot no membro interior parético não levou a nenhuma diferença na simetria do caminhar sobre o solo ou

na esteira, mesmo com os testes realizados sem a ação motorizada do robô, sabe-se que quando gerado ativamente a formação de torques no tornozelo, essas diferenças devido ao seu agregado inércia e fricção ficariam ainda menores. Quanto à análise secundária, descobriram que caminhada em esteira apresentou maior simetria da marcha em relação à andar sobre o solo. Durante o treino na esteira havia maior simetria entre os membros parético e preservado, na fase de apoio. Os autores sugerem que a caminhada na esteira com a perna unilateralmente carregada tem pouco impacto sobre a cinemática do tornozelo. Além disso, esses desvios podem ser ainda mais reduzido quando o Anklebot é usado no modo ativo. Os dados apresentados sugerem que indivíduos com hemiparesia podem potencialmente usar um exoesqueleto robótico de forma segura.

No estudo recente utilizando o Anklebot realizado por Roy, Forrester e Mackro (2011), foi realizada uma única sessão de treinamento interativo, com duração de uma hora, em indivíduos saudáveis e com hemiparesia crônica, que realizaram o treinamento na postura sentada associado à interface visual (*game*) de treinamento personalizado em que os pacientes poderiam ser desafiados em relação ao seu nível de capacidade funcional. Como resultado deste estudo piloto, os autores observaram que há evidências de mudanças positivas em uma única sessão em relação ao aprendizado motor a curto prazo, caracterizado pelas mudanças de velocidade, melhora na suavidade dos movimentos dos tornozelos paréticos, o que não se ocorreu nos indivíduos saudáveis, estes ganhos motores observados, se mantiveram após 48 horas do treinamento. Os autores defendem que o Anklebot é uma ferramenta importante de assistência para o aprendizado motor dos membros inferiores, por proporcionar um ambiente de treinamento personalizado e adaptado, principalmente ao se relacionar à locomoção e é um passo importante para a compreensão da capacidade do tornozelo hemiparético reaprender uma tarefa motora.

Forrester et al. (2011) realizaram um estudo piloto com 8 indivíduos pós AVE, que participaram de três sessões por semana, com duração de 1 hora cada, onde praticavam movimentos de dorsiflexão e flexão plantar na postura sentada. Os movimentos era associados às solicitações importas por um jogo computacional (*vídeo game*). Foram avaliados a amplitude de movimento do membro parético, a força, o controle motor e o caminhar em solo antes e depois de seis semanas de reabilitação. Os dados mostram que houve melhora no caminhar, relacionado ao aumento da velocidade, controle motor.

Com embasamento nestes estudos de outros países, o Laboratório de Mecatrônica da EESC/USP vêm trabalhando no desenvolvimento de um exoesqueleto para membros inferiores que considera o controle de impedância e a interação entre o paciente e o sistema robótico. A principal característica da órtese em desenvolvimento encontra-se no tipo de acionamento utilizado. Pretende-se utilizar atuadores elásticos em série (ROBINSON et al., 1999), equipamentos desenvolvidos para a implementação do controle de impedância

em sistemas robóticos interativos (PRATT; KRUPP; MORSE, 2004). A Figura 2 mostra a representação gráfica da versão final do exoesqueleto com os atuadores elásticos em série inseridos nas articulações do quadril, joelho e tornozelo. Os atuadores projetados consideram diferentes tipos de acionamento e de configuração da série elástica. Inicialmente considerou-se a construção da parte do exoesqueleto referente à articulação do tornozelo com a construção de uma órtese tornozelo-pé ativa (OTPA). A órtese finalizada pode ser vista na Figura 2, na qual observa o acionamento realizado pelo atuador elástico em série, fixado na parte de trás do dispositivo construído.

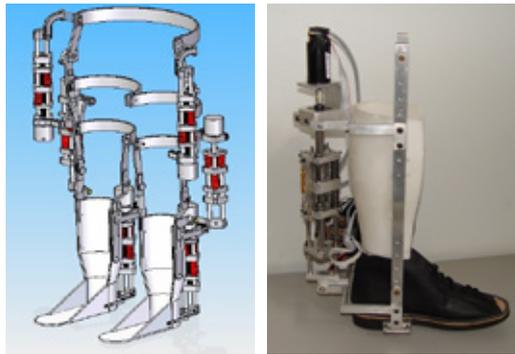


Figura 2 – Exoesqueleto e órtese tornozelo-pé ativa desenvolvidos no Laboratório de Mecatrônica.

Fonte: Jardim, 2009.

A Rutgers “Ankle” interface de reabilitação ortopédica é outro dispositivo de reabilitação do tornozelo. Consiste em uma plataforma de *Stewart Haptic*, com seis graus de liberdade, com sistema de feedback de força e a interface é uma plataforma robótica controlada por computador que mede a posição e orientação do pé. O sistema utiliza cilindros de dupla ação pneumática, potenciômetros lineares, e um sensor de força 6-DOF. O dispositivo representado na Figura 3 fornece as forças resistivas e torques do pé do paciente, em resposta à realidade virtual baseado em exercícios.



Figura 3 – Sistema robótico Rutgers para reabilitação do tornozelo, associado com sistema de realidade virtual.

Fonte: Mirelman, Bonato e Deutsch, 2008.

Mirelman, Bonato e Deutsch (2008) verificaram se o treinamento com um sistema

robótico com realidade virtual (RV) produz maior influência no treinamento de marcha sobre o solo comparado ao uso apenas de reabilitação robótica. Foram avaliados 18 indivíduos com hemiparesia crônica, com déficit na marcha, com dorsiflexão antigravitacional parcial, com capacidade de deambular por 50 metros sem auxílio. Foi proposto um treinamento de 4 semanas, durante 3 meses.

É o primeiro estudo a comparar os efeitos do treinamento de membros inferiores pelo acoplamento de um robô com um ambiente virtual e o treino de robô com o feedback realizado pelo terapeuta. O estudo não avaliou somente os efeitos do treinamento em laboratório mas também avaliou as medidas da função em casa e no ambiente da comunidade.

Os sujeitos movimentaram o tornozelo em dorsiflexão, flexão plantar, inversão, eversão, e uma combinação destes movimentos. Velocidade, força e desempenho de linha de base e exercícios de coordenação foram medidos pelo robô no início de cada sessão e foram usados como referência para o protocolo de exercícios. Exercícios realizados por cada grupo eram comparáveis e consistiam de aquecimento, resistência, velocidade, fortalecimento e exercícios de coordenação, com ênfase na direção de movimento e tempo do movimento segmentar. A intensidade de treino e progressão do protocolo de exercícios foi desenvolvida com base em estudos anteriores e ajustados individualmente para os sujeitos com base nas observações de seu desempenho (em relação à precisão) e ao relatarem fadiga. O mesmo fisioterapeuta auxiliou na formação de ambos os grupos.

Indivíduos do grupo robô com realidade virtual executaram os exercícios usando os movimentos do pé para navegar em um avião ou um barco através de um ambiente virtual que continha uma série de metas. A posição e momento dos alvos eram manipuladas para assegurar o treinamento, incluíram movimentos discretos e combinados do tornozelo. Indivíduos que treinaram apenas com o dispositivo robótico só receberam os mesmos exercícios que o grupo robótico com realidade virtual, mas sem o ambiente virtual.

Com os resultados obtidos por Mirelman, Bonato e Deutsch, 2008 observaram que os sujeitos do grupo apenas robótico apresentaram maior queixa de fadiga, sendo necessárias maiores pausas, comparado ao grupo com realidade virtual. Melhorias clinicamente significativas medidas em laboratório e no mundo real na capacidade de andar, como a melhora do resultado do treinamento de velocidade de marcha e a melhora na distância percorrida foram mantidas por 3 meses. Também foram observadas melhorias no grupo controle, que foram treinados com apenas o dispositivo robótico sem as capacidades da realidade virtual, no entanto, as alterações eram pequenas e não proporcionaram mudanças funcionais ou comportamentais significativas. Consistente com a literatura de plasticidade neural que suporta a intensidade do treinamento, bem como a resolução de problemas para conseguir uma resposta comportamental, os ambientes virtuais projetados para melhorar a marcha para as pessoas após AVE são desenvolvidas e perfeioadas, as comparações entre

estes sistemas será garantido.

Outro exemplo de dispositivo robótico para reabilitação de tornozelo, ilustrado na Figura 4, foi proposto por Agrawal et al. (2005) que projetaram uma órtese tornozelo-pé, com dois graus de liberdade, que auxilia nos movimento de dorsiflexão / flexão plantar (com controle ativo feito por um servomotor DC) e inversão e eversão (com controle passivo feito por uma mola e amortecedor).

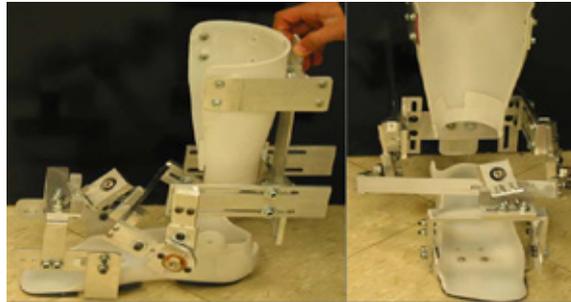


Figura 4 – Órtese tornozelo pé, com dois graus de liberdade.

Fonte: Agrawal et al. 2005.

A mola e o amortecedor criam uma parede virtual e restringem o movimento além de uma certa faixa de aplicação da força da mola. O dispositivo é destinado a ser utilizado tanto como medição independente das forças e torques articulares (como KinCom e Biodex) como pode ser uma parte integrante para reabilitação de indivíduos com fraqueza nos músculos dorsiflexores do tornozelo. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo de cinemática e dinâmica do tornozelo. O modelo cinemático leva à localização dos dois eixos comuns. Esta informação foi utilizada na concepção dos dois graus de liberdade da órtese tornozelo-pé. A atuação da órtese é conjunta com a dorsiflexão acionada ao mesmo tempo com uma mola de torção e um amortecedor, que restringem a amplitude de movimento articular da inversão e eversão segundo aos graus de liberdade. O design atual da órtese tornozelo pé pesa cerca de 2,5 kg e os autores pretendem realizar modificações de projeto e escolher material adequado para reduzir o peso. Os dados antropomórficos utilizados na órtese atual foram feitos à partir de uma média dos sujeitos. No entanto, os ângulos de cinemática podem ser medidos e objeto específico da órtese pode ser construído por cubos de substituição, usados para a obtenção de orientação desejada.

Ward et al. (2010) realizaram um estudo de caso com três indivíduos que sofreram AVE, que foram treinados por três semanas, utilizando uma órtese tornozelo pé ativa (PAFO), mostrada na Figura 5, com atuação em um grau de liberdade por meio de um tendão robótico. A PAFO foi desenvolvida com um único grau de liberdade de rotação do tornozelo no plano sagital, a rotação é acionada pelo tendão robótico que é um motor DC acoplado com uma mola em série. A marcha é assistida em 50% pela atuação do robô. O padrão de referência para o lado proximal da mola é gerados de forma que os elementos elásticos são estirados no tempo adequado para produzir o momento padrão desejado do tornozelo.

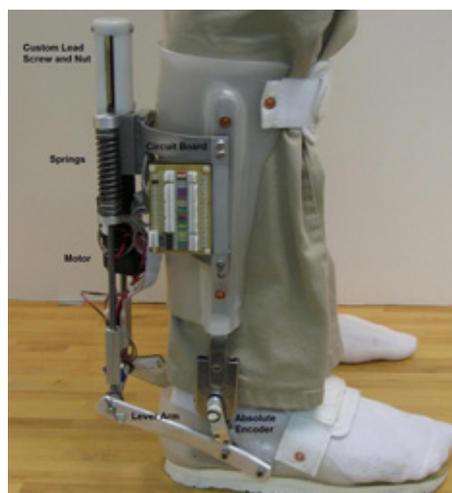


Figura 5 – Órtese tornozelo pé ativa, com atuação em um grau de liberdade por meio de um tendão robótico.

Fonte: Ward et al., 2010.

Os sujeitos realizaram treinamento três vezes por semana, durante três semanas, que consistiam em aquecimento, pré marcha sobre o solo, marcha na esteira, pós marcha sobre o solo e repouso. Para coleta dos dados foram utilizados sensores montados no robô (encoder absoluto), sistema de análise de movimento com uma câmera de 6 Hz e pelo teste de caminhada de seis minutos. A sessão consistiu em duas etapas, marcha com e sem auxílio da PAFO.

Os autores testaram dois sujeitos que utilizaram a PAFO em tamanho único confeccionada em plástico rígido e observaram que esses fatores levaram a uma redução no desempenho, mesmo assim observaram após o treinamento um aumento na amplitude de movimento da dorsiflexão com conseqüente aumento na velocidade da marcha. Além do aumento de força de 89%. Já no sujeito que utilizou uma PAFO com ajuste personalizado, os fatores conforto e segurança interferiram nos resultados, pois permite uma progressão mais natural do centro de pressão sobre o pé ao contrário de um plástico rígido de suporte para o pé. Observaram pelo sensor do robô melhora na cinemática do tornozelo afetado, como aumento na amplitude da dorsiflexão. Em relação à cinética, aumento no pico de momento e potência que resultaram em aumento na velocidade da marcha.

O aumento da velocidade da marcha foi resultante do aumento do comprimento da passada, com conseqüente diminuição da cadência. Com a análise dos dados, os autores verificaram que os indivíduos apresentaram um padrão de marcha típico. Concluíram que todos os sujeitos apresentaram mudanças positivas durante a marcha auxiliada pela PAFO, principalmente quando o teste foi realizado na esteira em comparação ao solo, onde estes ganhos ocorreram, porém em um ritmo mais lento. Conforto, estabilidade e solidez são parâmetros críticos de projeto para desenvolver um robô para terapia de marcha capaz de coleta de dados repetitivos, com baixa variabilidade. Os autores ainda não chegaram a conclusões sólidas relacionado às influências do ganho positivo na marcha com a PAFO para deambular sem auxílio.

A órtese robótica Lokomat, ilustrada na Figura 6, é um dispositivo já comercializado e incorporado na atuação clínica como auxílio à reabilitação de pacientes com lesão medular ou que sofreram AVE, é uma órtese bilateral informatizada para marcha utilizado em conjunto com um suporte de peso peso corporal parcial para caminhada na esteira rolante. Ela orienta principalmente os quadris e joelhos por meio de cinemática pré-programada. Não fornece assistência ativa no tornozelo: queda do pé é contrabalanceada por um mecanismo de mola para apoiar dorsiflexão durante a fase de balanço da marcha (ROY et al., 2009).



Figura 6 – Órtese Robótica Lokomat.

Fonte: The european regional development fund and the ministry of industry and trade of the czech republic support investment in your future.

O treinamento regular de pacientes é realizado impondo um padrão de marcha fixo através de um controle de posição das articulações da órtese robótica. Porém, é importante garantir que o paciente esteja efetivamente andando, e não apenas tendo a sua perna movida passivamente pelo aparelho de locomoção. Esta condição levou ao desenvolvimento de três algoritmos de adaptação do padrão de marcha (RIENER et al., 2005; JEZERNIK; COLOMBO; MORARI, 2003). Esses algoritmos possibilitam ao paciente alterar o padrão de marcha conforme o seu grau de locomoção voluntária. Na área de reabilitação, assistida pela robótica, usualmente três algoritmos de adaptação do padrão de marcha são utilizados. O primeiro deles produz uma adaptação do padrão de marcha estimando primeiramente os torques de interação homem-robô e então adaptando as trajetórias angulares de modo a reduzir tais torques de interação. O segundo algoritmo relaciona o torque de interação homem-robô com a mudança necessária de aceleração das trajetórias angulares. No terceiro algoritmo, o controle de impedância gera uma relação entre os torques de interação e os desvios de posição permitidos. Este procedimento permite adaptação direta das trajetórias angulares através do desvio de posição medido ou torques de interação estimados (JARDIM, 2009).

Conforme a vasta revisão de literatura coletada, observamos que inovações tecnológicas aplicadas à reabilitação do AVE incluem robótica e realidade virtual. O ímpeto de utilizar essa tecnologia como um recurso de reabilitação é a sua capacidade em aumentar

a motivação, ser adaptável, coletar dados, manter a segurança do paciente, e promover práticas individualizada intensiva e repetitiva. Dispositivos de robótica e realidade virtual permitem a criação de intervenções onde a duração, intensidade, e feedback podem ser manipulados e aprimorados para criar exercícios mais adequados para o indivíduo. Estas características de treinamento foram relatados estar estreitamente relacionado com a recuperação, reorganização e plasticidade cortical após a lesão encefálica (MIRELMAN; BONATO; DEUTSCH, 2008).

Então, analisando todos estes aspectos, propomos a elaboração de um novo dispositivo robótico para incrementar a reabilitação do tornozelo, a plataforma robótica de reabilitação do tornozelo (PRRT), ilustrado na figura 7. Para a implementação de um sistema robótico de reabilitação, é crucial o contato entre o paciente e o robô, com atenção especial à integridade física do usuário, já enfraquecida pela sua condição. Para isso é aplicado ao robô um controle da impedância, que pode operar em diferentes momentos, durante o processo de reabilitação, como uma assistência ao movimento ou resistindo ao movimento, classificando-os assim como robôs interativos. O dispositivo eletromecânico responsável pela movimentação da Plataforma Robótica de Reabilitação de Tornozelo – PRRT é um atuador que possui um elemento elástico em série com um motor para que o mesmo possa ter rigidez variável, ou seja, a interface entre o motor e a carga tem impedância controlável. Esta característica é importante em robôs ou dispositivos que tenham contato com humanos.



Figura 7 – Plataforma Robótica de Reabilitação de Tornozelo.

Fonte: Imagem realizada pelos autores deste trabalho.

Por controlar a plataforma de reabilitação, o atuador necessita ter mecanismos de segurança que garantam a integridade do usuário em qualquer situação. Para isso possui três mecanismos distintos de segurança: mecânico, eletrônico e software. O primeiro está relacionado ao tamanho físico do atuador, impedindo o efetuador de percorrer distâncias prejudiciais ao usuário, os sensores de fim de curso (eletrônicos) são acionados quando o efetuador está no limite superior ou inferior de sua trajetória fazendo com o que o motor seja desligado, por fim, o software responsável pelo controle do sistema possui limites na amplitude de movimentação do tornozelo de forma que desabilita e desliga os motores uma vez que são alcançados. A redundância no sistema de segurança garante ao usuário uma

movimentação correta na amplitude e na força aplicada ao tornozelo (JARDIM; SIQUEIRA, 2009). O controle de impedância, implementado por um atuador elástico em série (AES) permite, além de uma interação segura entre o paciente e o sistema robótico, que um determinado comportamento desejado da articulação durante a sessão de reabilitação seja especificado pelo fisioterapeuta (PALUSKA; HERR, 2006), já que os parâmetros de força, velocidade e amplitude de movimentos que serão escolhidos para o funcionamento da PRRT podem ser escolhidos de acordo com o objetivo delineado.

Neste estudo optou-se pela aplicação de uma Plataforma Robótica de Reabilitação de Tornozelo - PRRT que será utilizada com o indivíduo em repouso associado a jogos virtuais que estimularão os movimentos de dorsiflexão do tornozelo.

O conceito inicial da PRRT baseado na primeira versão de órtese tornozelo-pé ativa desenvolvida em Jaukovic (1981), que consistia em um motor DC acoplado à órtese para prover a extensão/flexão da articulação. Também inspirados nessa idéia Blaya, Herr (2004) desenvolveram uma órtese para auxiliar pacientes com pé equino. Assim, foi desenvolvida uma órtese automatizada para auxiliar pacientes com deficiência denominada pé equino. A órtese é montada à partir de uma AFO articulada (*Ankle Foot Orthosis*), à qual é adicionado um AES, que apresenta características ideais para uso em máquinas humanas, devido a sua interação de controle de força, controle de impedância, absorção de impacto e baixo atrito. Com este dispositivo é possível variar a impedância da articulação do tornozelo durante a fase de flexão plantar e permitir baixas impedâncias durante a fase de balanço. Ensaios clínicos mostraram que esta órtese pode melhorar o caminhar de indivíduos com tal deficiência, aumentando a velocidade do caminhar, fazendo com que o pé não arraste, promovendo maior segurança durante a fase de apoio. O dispositivo é relativamente compacto e de baixa potência elétrica (BLAYA; HERR, 2004).

As peças que o compõe, foram usinadas em alumínio, e a montagem foi feita no Laboratório de Mecatrônica - Departamento de Engenharia Mecânica. O dispositivo é composto por 6 peças de suporte, 1 efetuator, 1 motor DC de 150W, acoplamento elástico, fuso de esferas recirculantes com castanha, mancais e rolamentos para suporte do fuso. O potenciômetro é fixado através de um suporte feito em acrílico, que por sua vez é fixado nas peças de suporte (JARDIM; SIQUEIRA, 2009).

Neste sentido, o equipamento também poderá ser utilizado para avaliar com exatidão a força muscular dos dorsiflexores e amplitude de movimento articular ativa de dorsiflexão, tendo em vista a escassez de recursos de avaliação objetiva para os profissionais de Fisioterapia, o que coloca em dúvida os valores mensurados nos testes convencionais. Também será avaliado o uso da PRRT como recurso auxiliar nos exercícios para melhorar a força muscular, amplitude de movimento articular de dorsiflexão e a coordenação motora na articulação do tornozelo. Porém, anteriormente ao uso clínico da PRRT, faz-se necessário

verificar a adequação ergonômica e técnica, bem como avaliar o grau de satisfação do usuário e posteriormente, após os ajustes necessários, poderá ser utilizada como recurso terapêutico inovador em conjunto com a Fisioterapia convencional.

Para a consolidação de um novo recurso de reabilitação, tanto com o objetivo de avaliar, quanto o de incrementar as intervenções, é necessário um processo de validação do método proposto. A validade refere-se à precisão do instrumento em medir o que se propõe medir. Assim, serão realizados testes comparativos em indivíduos hígidos e hemiparéticos, comparando-se a avaliação da força muscular e amplitude de movimento articular ativa fornecida pela PRRT e por métodos convencionais e usados atualmente na prática clínica (teste de força muscular baseado no estudo de Músculos, Provas e Funções, citado por Kendall et al., 1995 e Goniometria, citado por Marques, 2003, respectivamente) (PERROCA; GAIDZINSKI, 1998).

5. CONCLUSÃO

Este levantamento bibliográfico comprova as potenciais melhorias relacionado ao ganho motor e aprendizado motor na reabilitação de tornozelo pós AVE, tanto em fase sub-aguda como no crônica. Com os resultados das diversas pesquisas levantadas, pode-se verificar de uma forma geral que o treinamento intensivo da articulação do tornozelo, apresentaram ganhos motores relacionados à aumento de velocidade, amplitude de movimento articular, ganho de força, menor resistência articular. Tais repostas positivas mostram estímulos na neuroplasticidade positiva e aprendizado motor, mesmo nas condições dos hemiparéticos crônicos.

A utilização dos dispositivos robóticos associado a estímulos virtuais potencializaram ainda mais os ganhos. O uso de impedância mecânica (por exemplo, atuador elástico em série) dos dispositivos robóticos promovem uma interação entre o paciente e o robô, fazendo com que o paciente desenvolva os movimentos dentro da sua capacidade individual. Em todos os tipos de treino, na postura sentada, ao caminhar sobre uma esteira rolante ou sobre o solo, apresentaram ganhos relacionados à velocidade da marcha, comprimento da passada e cadencia.

Conforme os ensaios clínicos realizados em outros países a respeito da usabilidade e eficácia de órteses tornozelo-pé ativas, acreditamos que a PRRT irá beneficiar indivíduos que sofreram lesão cerebral, pois proporcionará movimentação ativa da articulação do tornozelo, que poderá resultar na melhora da força muscular, do controle motor e da sensibilidade. Além de proporcionar momentos lúdicos, de descontração, lazer e bem estar ao praticante. Poderá influenciar de forma positiva na melhora da qualidade de vida, promovendo inclusão social e incentivo à continuidade do processo de reabilitação.

É importante a continuidade dos estudos para aprimorar os dispositivos em teste para

que sejam incorporados na prática clínica como forma de incrementar a terapia, por meio de um recurso eficaz e motivados, além de serem recursos para mensurar com exatidão os parâmetros individuais de cada paciente.

AGRADECIMENTOS

À SORRI-Bauru, pela parceria com o Laboratório de Mecatrônica da Escola de Engenharia de São Carlos, e por disponibilizar o estudo prático nos pacientes da instituição, que será realizado em uma próxima etapa.

Pelo apoio financeiro da Fapesp.

REFERÊNCIAS

- ABRAMCZUK, B.; VILLELA, E. A luta contra o AVC no Brasil. *Com Ciência – Revista Eletrônica de Jornalismo Científico*, 109, 2009. Disponível em: <<http://www.comciencia.br/comciencia/handler.php?section=8&edicao=47&id=582>>. Acesso em: 08 out. 2011.
- AGRAWAL, A.; BANALA, S. K.; AGRAWAL, S. K.; MACLEOD, S. A. B. Design of a Two Degree-of-freedom Ankle-Foot Orthosis for Robotic Rehabilitation. In: *IEEE 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON REHABILITATION ROBOTICS*, 2005, Chicago, USA. Anais p.41-44, jun-jul, 2005.
- AHN, J.; HOGAN, N. Feasibility of Dynamic Entrainment with Ankle Mechanical Perturbation to Treat Locomotor Deficit. In: *32ND ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE EMBS*, 2010, Buenos Aires, Argentina. Anais p.3422-3425, aug-sep, 2010.
- ALVES, M. B.; KASHIWGI, N. M.; CYPRIANO, A. S.; SATO, R. C. Custo-benefício de protocolos para o acidente vascular cerebral: experiência do Hospital Israelita Albert Einstein. *Einstein: Educação Continuada em Saúde*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 39-41, 2009.
- ARAÚJO, R. C. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de auxílio à reabilitação motora do membro superior após acidente vascular encefálico. 2011. 117f. Dissertação (Doutorado em Bioengenharia). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- BLAYA, J. A.; HERR, H. Adaptive control of a variable-impedance ankle-foot orthosis to assist drop-foot gait. In: *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL SYSTEMS AND REHABILITATION ENGINEERING*, 2004. Anais v. 12, n.1. march 2004.
- BORGES, D.; MOURA, E.W. de; LIMA, E.; SILVA, P. A. C. *Fisioterapia: Aspectos Clínicos e Práticos da Reabilitação*. 2. ed. São Paulo: Artes Médica, 2007.
- CANCELA, D. M. G. *O Acidente Vascular Cerebral – Classificação, Principais Consequências, e Reabilitação*. Lusíada do Porto, 2008. 46f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Licenciatura em Psicologia) - Universidade Lusíada do Porto, 2008.
- DAVIES, P, M. *Passos a seguir*. São Paulo, Manole, 1996.
- FASOLI, S. E.; KREBS, H. I.; STEIN, J.; FRONTERA, W. R.; HOGAN, N. Effects of robotic therapy on motor impairment and recovery in chronic stroke. *Arch Phys Med Rehabil*. Cambridge, v.84, p. 477-82, april 2003.
- FORRESTER, L. W.; ROY, A.; KREBS, H. I.; MACKRO, R. F. Ankle training with a robotic device improves hemiparetic gait after a stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, v.25, n.4, p. 369-377, 2011.
- FRANZOI, A. C.; KAGOHARA, N. S. Correlação do perfil de deambulação e velocidade da

marcha em um grupo de pacientes hemiplégicos atendidos em um centro de reabilitação. *Acta Fisiátrica*, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 78-81, 2007.

GREVE, J. M. D. *Tratado de Medicina de Reabilitação*. São Paulo: Roca, 2007.

JARDIM, B. Atuadores Elásticos em Série Aplicados no Desenvolvimento de um Exoesqueleto para Membros Inferiores. 2009. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2009.

JARDIM, B.; SIQUEIRA, A. G. Development of Series Elastic Actuators for Impedance Control of an Active Ankle Foot Orthosis. In: 20TH INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 2009, Gramado. Anais p. 15-20. Gramado, nov. 2009.

JAUKOVIC, N. Active Peroneal Orthosis. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EXTERNAL CONTROL OF HUMAN EXTREMITIES. Anais p.13-20, 1981.

JEZERNIK, S.; COLOMBO, G.; MORARI, M. Automatic gait-pattern adaptation algorithms for rehabilitation with a 4-dof robotic orthosis. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v. 20, n. 3, p. 574-582, june 2004.

KENDALL, F. P.; MCCREARY, E. K.; PROVANCE, P. G. *Músculos, Provas e Funções*. São Paulo, Manole, 4 ed. 1995.

KHANNA, I.; ROY, A.; RODGERS, M. M.; KREBES, H. I.; MACKRO, R. M.; FORRESTER, L. W. Effects of unilateral robotic limb loading on gait characteristics in subjects with chronic stroke. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, Massachusetts, v. 7, n. 23, p. 3-8, 2010. Disponível em: <http://www.jneuroengrehab.com/content/7/1/23>. Acesso em: 6 out. 2011.

LOPES, P. G.; VASCONCELOS, J. C. P.; RAMOS, A. M.; MOREIRA, M. C. S.; LOPES, J. A. F.; KAVAMOTO, C. A. O efeito da terapia de biofeedback por eletromiografia de superfície na flexão do joelho da marcha hemipléica. *Acta Fisiátrica*, São Paulo, v. 11, n. 3, p. 125-131, 2004.

MARQUES, A. P. *Manual de Goniometria*. São Paulo, Manole, 2 ed. 2003.

MIRELMAN, A.; BONATO, O.; DEUTSCH, J. E. Effects of Training With a Robot-Virtual Reality System Compared With a Robot Alone on the Gait of Individuals After Stroke. *Journal of the American Heart Association*, Dallas, v. 40, p. 169-174, 6 nov. 2008.

MOURA, E. W.; LIMA, E.; BORGES, D.; SILVA, P. A. C. *Fisioterapia: Aspectos Clínicos e Práticos da Reabilitação*. São Paulo: Editora Artes Médicas, 2 ed. 2009.

O'SULLIVAN, S. B.; SCHMITZ, T. J. *Fisioterapia: avaliação e tratamento*. 4.ed. São Paulo: Manole, 2004.

OTTOBONI, C.; FONTES, S. V.; FUKUJIMA, M. M. Estudo comparativo entre a marcha normal e a de pacientes hemiparéticos por Acidente Vascular Encefálico: Aspectos biomecânicos. *Revista Neurociências*, São Paulo, v. 10, n. 1, p. 10-16, 2002.

PALUSKA, D.; HERR, H. The effect of series elasticity on actuator power and work output: Implications for robotic and prosthetic joint design. *Robotics and Autonomous Systems*. Massachusetts, v. 54, p.667-673, 2006.

PERROCA, M. G.; GAIDZINSKI. Sistema de classificação de pacientes: construção e validação de um instrumento. *Revista da Escola de Enfermagem da USP*, São Paulo, v. 32, n. 2, ago. 1998.

PRATT, J.; KRUPP, B. T.; MORSE, C. J. The RoboKnee: An exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, 2004.

RIENER, R.; LUNENBURGER, L.; JEZERNIK, S.; ANDERSHITZ, M.; COLOMBO, G.; DIETZ, V. Patient-cooperative strategies for robot-aided treadmill training: First experimental results. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, v. 13, n. 2, p. 380-394, 2005.

ROBINSON, D. W.; PRATT, J.; PALUSKA, D.; PRATT, G. Series elastic actuator development for a biomimetic walking robot. In *Proceedings of the 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Atlanta, USA, 1999.

- ROMERO, V. M.; CARVALHO, P. T. C.; LARAIA, E. M. S.; SOARES, N. C. Análise das variáveis de distância da marcha de pacientes com acidente vascular encefálico. *Conscientia e Saúde*, v. 7, n. 3, p. 329-334, ago. 2008.
- ROY, A.; FORRESTER, L. W.; MACKRO, R. F. Short-term ankle motor performance with ankle robotics training in chronic hemiparetic stroke. *Journal of Rehabilitation Research e Development*, v. 48, n. 4, p. 417-430, 2011.
- ROY, A.; KREBS, H. I.; WILLIAMS, D. J.; BEVER, C. T.; FORRESTER, L. W.; MACKO, R. M.; HOGAN, N. Robot-Aided Neurorehabilitation: A Novel Robot for Ankle Rehabilitation. *IEEE Transactions on Robotics*, v. 25, n.3, p. 569-582, june 2009.
- SANTOS, F. R. P. Análise de duas propostas para a reabilitação da marcha em indivíduos portadores de sequelas neurológicas crônicas. 2010. 99f. Dissertação (Doutorado em Fisioterapia). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- SCHUSTER, R. C.; SANI, C. R.; DALBOSCO, V. Efeitos da estimulação elétrica funcional (FES) sobre o padrão de marcha em paciente hemiparético. *Acta Fisiátrica*, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 82-86, 2007.
- SILVA, E. J. A. Reabilitação após AVC. Dissertação (Mestrado). 2010. 108f. Faculdade de Medicina Universidade do Porto, Porto, 2010.
- SILVERMAN, A. K.; NEPTUNE, R. R. Differences in whole-body angular momentum between below-knee amputees and non-amputees across walking speeds. *Journal of Biomechanics*, v. 44, p. 379-385, 2011.
- SIQUEIRA, A. A. G. Reabilitação Robótica do Caminhar: Novas Estratégias Baseadas em Características Naturais. 2011. 22f. Projeto (Pós-Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2011. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <carol.barbosa.fisio@gmail.com> em 6 out. 2011.
- TEIXEIRA-SALMELA, L. F.; OLIVEIRA, E. S. G.; SANTANA, E. G. S.; RESENDE, G. P. Fortalecimento muscular e condicionamento físico em hemiplégicos. *Acta Fisiátrica*, São Paulo, v. 7, n.3, p. 108-118, 2000.
- THE european regional development fund and the ministry of industry and trade of the czech republic support investment in your future. Lokomat, Robotic movement therapy on treadmill. Disponível em: <<http://www.resi.cz/index.php?item=9002.021&setlang=en>>. Acesso em: 6 nov. 2011.
- WARD, J.; SUGAR, T.; STANDEVEN, J.; ENGSBERG, J. R. Stroke Survivor Gait Adaptation and Performance After Training on a Powered Ankle Foot Orthosis. *IEEE International Conference on Robotics and Automation Anchorage Convention District, Alaska, USA*, v.3, n.8, p.211-216, may. 2010.

