

Fisioter Bras 2020;21(1)Supl2:24-32  
<https://doi.org/10.33233/fb.v21i1.3939>

## ARTIGO ORIGINAL

### Análise da confiabilidade e eficiência de exoesqueletos em linha de produção na manufatura

### *Analysis of the reliability and efficiencies of exoskeletons in manufacturing production line*

José Ronaldo Veronesi Junior, Ft., D.Sc.\*, Helmar Aquino, Ft.\*\*

*\*Fisioterapeuta do Trabalho, Ergonomista, Perito Judicial, Doutor em Ciências Biomédicas e CEO do IEDUV, \*\*Fisioterapeuta do Trabalho, Ergonomista da Learn Corporation*

**Correspondência:** José Ronaldo Veronesi Junior, Instituto Educacional Veronesi - IEDUV, Sala 401, torre A, Av. João Palácio, 300, Eurico Sales 29160-161 Serra ES

Trabalho apresentado na I semana científica do IEDUV – I Seminário de Perícia Fisioterapêutica pelo Método Veronesi, Vitória/ES, 17 a 20 de janeiro de 2019 (Prof. Dr. Francisco Rebelo, Universidade de Lisboa; Prof. Dr. José Ronaldo Veronesi Junior, IEDUV/ Faculdade Delta; Prof. Msc. Cristiane de Oliveira Veronesi, IEDUV/ Faculdade Delta; Prof. Dra. Lisandra Vanessa Martins, UFES)

José Ronaldo Veronesi Junior: veronesi@ieduv.com.br

Helmar Aquino: helmar.aquino@gmail.com

## Resumo

**Introdução:** Cada vez mais procuram-se por alternativas capazes de minimizar os efeitos provenientes de trabalhos repetitivos e esforços exagerados dentro das indústrias em nosso país. Logo, soluções robóticas ganham ênfase na indústria, como uma tecnologia alternativa inovadora capaz de operar com a inteligência e a adaptação de um humano, juntamente com a força e a tecnologia de um robô. **Objetivos:** O presente estudo objetivou estudar a confiabilidade e eficiência de dois modelos de exoesqueleto para a linha de produção de manufatura. **Métodos:** O presente estudo ergonômico ocorreu em uma empresa de manufatura, onde foi definido no total 9 atividades para avaliar o uso de dois modelos de exoesqueleto. Um exoesqueleto robótico para ombros, da marca Comau, modelo Mate Rel. 1.0 que foi testado nas 6 atividades e outro exoesqueleto elástico para coluna lombar da marca Morita Rakunie que foi testado em 3 atividades. Para analisar a eficiência dos exoesqueletos, foram utilizados eletromiografia de superfície para medir o comportamento neuro muscular dos segmentos envolvidos, monitor cardíaco, dinamômetro e questionários de usabilidade. Todas atividades estudadas os métodos foram aplicados nos mesmos trabalhadores com e sem o exoesqueleto. **Resultados:** O exoesqueleto robótico para ombro apresentou-se eficiente com significância estatística pelo teste t de Student em duas das 6 atividades, apresentou uma frequência cardíaca média menor (91 bpm) com o exoesqueleto do que sem o exoesqueleto (110 bpm). O exoesqueleto elástico para lombar apresentou-se confiável com significância estatística pelo teste t de Student em uma das 3 atividades, com o exoesqueleto ocorreu um aumento de 17% da força lombar. Ambos os equipamentos e mostraram-se ter usabilidade mas necessita de treinamento para utilização. **Conclusão:** Considerando o princípio da ergonomia, onde temos sempre que adaptar o ambiente ao homem, propiciando o máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente, os exoesqueletos são aparatos externos corporais que podem auxiliar na diminuição do esforço muscular como forma de atenuação de riscos biomecânicos em algumas atividades, desde que se faça um estudo detalhado para validar as atividades a serem aplicadas. Considerando os resultados encontrados no presente estudo ergonômico sobre a eficiência de aparatos preventivos, como exoesqueleto elástico e biônico, podemos concluir que para real eficiência do sistema preventivo, levando assim um efeito controle dos riscos ergonômicos da tarefa, se faz necessário que se aplique o protocolo de aplicabilidade do exoesqueleto descrito neste estudo. **Palavras-chave:** exoesqueleto, ergonomia, eletromiografia, DORT, manufatura

## Abstract

**Introduction:** Increasingly, we are looking for alternatives capable of minimizing the effects of repetitive work and exaggerated efforts within the industries in our country. Soon, robotic solutions gain an emphasis in the industry as an innovative alternative technology capable of operating with the intelligence and adaptation of a human, along with the strength and technology of a robot. **Objectives:** The present study aimed to study the reliability and efficiency of two exoskeleton models for the manufacturing production line. **Methods:** The present ergonomic study was performed at the Learn unit at Jeep Supply Park - SP15, where a total of 9 activities were defined to evaluate the use of two exoskeleton models. A robotic shoulder exoskeleton of the Comau brand, Mate 1.0 model, which was tested in the 6 activities and another elastic exoskeleton for the lumbar spine of the Morita Rakunie brand that was tested in 3 activities. To analyze the efficiency of the exoskeletons, surface electromyography was used to measure the neuro muscular behavior of the involved segments, cardiac monitor, dynamometer and usability questionnaires. All activities studied methods were applied to the same workers with and without the exoskeleton. **Results:** The robotic shoulder exoskeleton was statistically efficient in two of the six activities, with a mean heart rate (91 bpm) compared without the exoskeleton (110 bpm). The elastic lumbar exoskeleton was found to be statistically reliable by Student's t-test in one of the three activities, with the exoskeleton showing a 17% increase in lumbar force. Both equipments have been shown to have usability but require training for use. **Conclusion:** Considering the principle of ergonomics, where we always have to adapt the environment to the man, providing maximum comfort, safety and efficient performance, exoskeletons are external body devices that can help in the reduction of muscular effort as a form of biomechanical risk mitigation in some activities, provided that a detailed study is done to validate the activities to be applied. Considering the results found in the present ergonomic study on the efficiency of preventive devices, such as elastic and bionic exoskeleton, we can conclude that for real efficiency of the preventive system, thus taking a control effect of the ergonomic risks of the task, it is necessary to follow the protocol of applicability of the exoskeleton described in this study.

**Key-words:** exoskeleton, ergonomics, electromyography, WMSD, manufacturing

## Introdução

Cada vez mais procuram-se por alternativas capazes de minimizar os efeitos provenientes de trabalhos repetitivos e esforços exagerados dentro das indústrias em nosso país. Logo, soluções robóticas ganham ênfase nesse ramo da indústria, como uma tecnologia alternativa inovadora capaz de operar com a inteligência e a adaptação de um humano, juntamente com a força e a tecnologia de um robô [1].

O uso de um dispositivo de assistência mecânica pode ser uma abordagem eficaz para reduzir as demandas físicas envolvidas no trabalho de sobrecarga muscular. Por exemplo, estudos apresentados por Rempel et al. [2,3] demonstraram que um dispositivo de auxílio projetado especificamente para perfurações aéreas na construção, pode produzir posturas de trabalho em elevação menos extremas e reduzir as demandas físicas. Além disso, um estudo recente [4] mostrou o potencial de usar um dispositivo assistido vestível de uso geral - um colete de exoesqueleto com um braço mecânico para transportar uma ferramenta manual - para reduzir efetivamente as demandas físicas na extremidade superior durante a perfuração aérea com um aumento relativo menor de demandas na região lombar. A utilização de um dispositivo auxiliar de utilização geral, geralmente é atraente, uma vez que tal dispositivo pode ser utilizado em diversas situações que requerem a mobilidade de um trabalhador e, possivelmente, para diferentes tarefas.

O primeiro exoesqueleto robótico do corpo humano, Hardiman, foi criado pela General Electric em 1965. Este exoesqueleto foi concebido com a ideia de aumentar a capacidade física do corpo humano para levantar 680 kg. Essa ideia era muito inovadora, mas a tecnologia dos atuadores, dos materiais, das fontes de energia e os tipos de controle de sistemas nessa época, fizeram possível somente a criação de um exoesqueleto de braço com movimentos bruscos e que não apresentava segurança para que uma pessoa pudesse usá-lo [5].

O exoesqueleto é a revolução do trabalho dentro do conceito de indústria 4.0 pelo seu formato disruptivo, tecnológico e focado em produtividade.

Até o lançamento do exoesqueleto no mercado, inúmeras foram os testes dentro de laboratórios de robóticas onde equipes de projetos realizaram ajustes, adequações, reengenharia de partes, estudo de materiais.

Dentro dos diferentes centros de pesquisa verifica-se o quanto os pesquisadores se esbararam nas limitações impostas para adaptação ao corpo. Por trás dessas implicações, existem muitas interações que precisam ser analisadas, das quais destaca-se: antropométrica, ambiente de trabalho, condições ambientais, dimensões do posto de trabalho, concepção do posto, biomecânica, cinesiologia etc. [6].

Exoesqueleto ou órtese é um dispositivo aplicado na parte externa de uma ou várias partes do corpo humano. Estes dispositivos são criados com várias finalidades, mas em geral, servem para apoiar os movimentos e/ou melhorar as capacidades do corpo humano.

Algumas outras finalidades na criação de exoesqueletos são:

- Apoiar o movimento humano quando a pessoa não tem a força suficiente para se movimentar (capacidade física limitada), por exemplo: idosos e pessoas com deficiência física.
- Prevenir lesões, por exemplo, no caso de trabalhos repetitivos ou que precisam de um esforço físico alto.
- Impedir o movimento humano indesejado que se apresenta com alguma doença neuromotora.
- Apoiar a reabilitação das pessoas com alguma deficiência física.
- Criar ambientes virtuais para teleoperação ou para alguma interação específica.
- Estudos e investigação biomecânica das partes do corpo humano [5].

Nos estudos de Boita [1] o projeto do exoesqueleto se mostrou bastante viável, atendendo as necessidades exigidas pela demanda e ainda podendo ser implantado em vários setores industriais.

Segundo Garcés [5] os resultados apresentados com exoesqueleto foram coerentes com o objetivo de obter movimentos seguros, suaves e naturais com relação ao movimento do braço humano.

É essencial que se faça uma análise mais complexa sobre exoesqueleto em ambiente de trabalho para evitar problemas futuros durante seu uso. O ambiente laboral precisa estar preparado para absorver todos os seus benefícios, mas, também, eventuais problemas e imprevistos que possam acontecer com o seu uso. Dentro do conceito de indústria 4.0 ocorre a necessidade de profissionais altamente especializados no ambiente com muita tecnologia e de maneira integrada.

A heterogeneidade dos estudos incluídos nesta revisão deixa os autores incapazes de sugerir consenso quanto às perspectivas do usuário sobre a tecnologia do exoesqueleto. No entanto, é aparente que os usuários são capazes de sugerir prioridades para o design do exoesqueleto e que as perspectivas dos usuários sobre a tecnologia do exoesqueleto podem mudar em resposta à experiência de uso. Os autores, portanto, sugerem que o design do exoesqueleto deve ser um processo iterativo, pelo qual as perspectivas dos usuários são buscadas, incorporadas e refinadas pela experiência tangível, para garantir que os dispositivos desenvolvidos sejam aceitáveis e utilizáveis pelas populações que eles buscam reativar [7].

Recomenda-se, que o uso de todo e qualquer modelo de exoesqueleto seja usado com critérios pré-definidos, com base na sua utilização dentro do posto de trabalho a partir de um estudo ergonômico aprofundado e com critérios rígidos de controle.

Recomenda-se também que especialistas, altamente especializados para analisar eventuais alterações musculo esqueléticas, fisiológicas, psíquicas e cognitivas durante o uso do exoesqueleto.

O objetivo desse estudo foi estudar a eficiência de dois modelos de exoesqueleto para a linha de produção de manufatura.

## Material e métodos

O presente estudo ergonômico ocorreu em uma empresa de manufatura, em abril de 2019. Inicialmente foi feita uma visita técnica de todas as operações e analisado os projetos ergonômicos das atividades que foram e estão sendo desenvolvidas pela ergonomia da empresa. Depois da visita técnica foram escolhidas as atividades a serem estudadas.

As atividades escolhidas para avaliar o exoesqueleto robótico para ombro foram: aplicação dos feltros anti-ruído na estrutura do assento, carregamento de estruturas, extração de peças (espumas), limpeza manual na espuma, aplicação de produto antirruído e retirada de

velcro das espumas. Para avaliar o exoesqueleto elástico da lombar foram escolhidas as atividades de: extração de peças (espumas), limpeza manual na espuma e retirada de peças cortadas em máquina - sacagem de peças.

#### *Descrição dos equipamentos avaliados*

Os equipamentos testados nesse estudo foram: Exoesqueleto para ombro (Shoulder) do modelo MATE 1.0. data de fabricação: 07 de 2018, da marca italiana Comau S.p.A. – Robotics. Esse equipamento possui um grau de flexão de braço de 30 para 120 graus, possui 5 tamanhos com ajustes na coluna, 7 níveis de torque.

O outro exoesqueleto foi da marca Morita Rakunie, um equipamento com componentes elásticos e rígido (tecido de Nylon, Polyuretano, Poliester e Polipropileno), os elásticos estão na parte posterior da coxa e em x no tronco, a parte rígida, tem um apoio na parte inferior dos joelhos, outra no quadril e uma terceira no tórax.

Para analisar da eficiência do exoesqueleto, do modelo MATE 1.0. Shoulder foram utilizados eletromiografia de superfície para medir o comportamento neuro muscular dos segmentos envolvidos, frequencímetro da marca Garmim 235 e questionário de usabilidade. Os eletrodos foram colocados nos seguintes músculos de forma bilateral: deltoide anterior, deltoide médio e trapézio superior.

A medida da frequência cardíaca foi realizada com o frequencímetro da marca Garmim forerunner 235, onde o trabalhador ficou por uma hora com o equipamento com e sem o exoesqueleto. Uso de frequencímetro pode levar a uma análise objetiva do esforço humano e o risco a saúde do trabalhador. Segundo a norma espanhola UNE-EN 28996 sobre Ergonomia.

**Tabela I – Frequência cardíaca com classificação de risco no trabalho segundo a norma espanhola UNU-EN 28996.**

<b>Classificação do trabalho</b>	<b>Média da frequência cardíaca durante a atividade</b>
Penoso	>110 bpm
Moderado	100 a 110 bpm
Leve	< 100 bpm

Para analisar da eficiência do exoesqueleto, elástico da marca Morita Rakuni, foram utilizados eletromiografia de superfície para medir o comportamento neuro muscular dos segmentos envolvidos. Para análise da força muscular foi utilizado um dinamômetro lombar da marca Crown de até 200 kgf. Foi analisado a força lombar com e sem o exoesqueleto elástico, onde foi realizado três medidas de 3 segundos cada com intervalo de 1 minuto entre cada uma delas para recuperação tecidual. As medidas de força foram monitoradas pela Eletromiografia de superfície na região lombar. Nessa análise a Hipótese Nula é que o exoesqueleto não aumenta a força muscular e a Hipótese Alternativa é que o exoesqueleto aumenta a força lombar.

Os eletrodos foram colocados nos seguintes músculos de forma bilateral: grande dorsal inferior, um na altura de L3 e outro de L4, grande dorsal superior, um na altura de L1 e outro de T12.

Para ambas análises, do exoesqueleto do ombro e da coluna, os eletrodos foram colocados em uma sala com clima estabilizado, a área escolhida não tinha pelos e foi realizado o procedimento de neutralidade da pele para não causar barreiras de transmissão. Logo após a colocação dos eletrodos, o trabalhador colocou sua roupa e foi para o posto de trabalho para coletar as medidas. A coleta de dados foi dada da seguinte forma, duas coletas de 90 segundos contínuo da mesma atividade com e sem o exoesqueleto, totalizando assim 4 medidas para cada tarefa.

A análise da usabilidade dos equipamentos foi dada tanto pela percepção do avaliador quanto dos trabalhadores nas seguintes situações:

- Usabilidade para colocar e retirar os equipamentos;
- Usabilidade durante o trabalho;

A análise estatística foi dada a partir das Hipóteses, nesse estudo tivemos duas Hipóteses, uma sobre a eficiência do exoesqueleto na diminuição do esforço e o outra a eficiência na força muscular. A Hipótese nula foi que a exigência e a força muscular é a mesma com e sem o exoesqueleto e a Hipótese alternativa foi que a exigência e muscular é menor e a força é maior

com o exoesqueleto, tendo assim menor probabilidade de fadiga muscular. Dessa forma a questão estatística a ser estudada seria entre medidas, como foi feito uma amostra, pois tratou-se do mesmo indivíduo com e sem o exoesqueleto, foi utilizado o teste pareado bicaudal, pois tivemos duas Hipótese, Foi utilizado um  $p < 0,05$  para significância estatística, o que corresponde a 95% de chance de reprodutibilidade dos resultados. Foi aplicado o teste t de Student para ver a diferença significativa entre os resultados. Além do teste de significância foi aplicado a análise bruta dos resultados para comparação dos dados.

## Resultados

Quando analisado o comportamento neuro muscular com o exoesqueleto do modelo Mate 1.0 shoulder, esse apresentou eficiência na diminuição de atividade neuromuscular com significância estatística em 2 das 6 atividades analisadas.

**Tabela II - Resultados da eficiência para redução de fadiga com e sem exoesqueleto de cada atividade analisada.**

<b>Análise do exoesqueleto do modelo Mate 1.0. Shoulder</b>	
<b>Atividade analisada</b>	<b>Resultados</b>
Aplicação dos feltros anti-ruído na estrutura do assento	Apresentou eficiente – $p < 0,05^*$
Revisão do banco	Não apresentou eficiente – $p > 0,05^{**}$
Extração de peças (espumas)	Apresentou eficiente – $p < 0,05^*$
Limpeza manual	Não apresentou eficiente – $p > 0,05^{**}$
Retirada de velcro das espumas	Não apresentou eficiente – $p > 0,05^{**}$
Aplicação de produto antirruído	Não apresentou eficiente – $p > 0,05^{**}$

\*Com significância estatística; \*\*Sem significância estatística.

Quando analisado o comportamento neuro muscular com o exoesqueleto do modelo Morita Rakunie para a coluna lombar, esse apresentou eficiência na diminuição de atividade neuromuscular com significância estatística em 1 das 3 atividades analisadas.

**Tabela III - Resultados da eficiência para redução de fadiga com e sem exoesqueleto de cada atividade analisada.**

<b>Análise do exoesqueleto elástico do modelo Morita Rakunie</b>	
<b>Atividade analisada</b>	<b>Resultados</b>
Atividade de extração de peças (espumas)	Apresentou eficiente – $p < 0,05^*$
Atividade de Limpeza manual	Não apresentou eficiente – $p > 0,05^{**}$
Atividade de Sacagem de peças	Não apresentou eficiente – $p > 0,05^{**}$

\*Com significância estatística; \*\*Sem apresentou significância estatística.

Quando analisado a frequência cardíaca do trabalhador com o uso do exoesqueleto do modelo Mate 1.0 shoulder, apresentou 91 bpm, sendo classificado como trabalho com esforço leve, já sem o uso do esqueleto a frequência cardíaca apresentada foi de 110 bpm estando no limite da classificação entre trabalho com esforço moderado para penoso.

Quando analisado o questionário de usabilidade, para ambos os esqueletos os trabalhadores relataram que os equipamentos foram úteis e que diminuiu o esforço durante o trabalho, mas que é necessário treinamento, devido a dificuldade de operacionalidade.

Quando analisado a força lombar com o exoesqueleto elástico, os trabalhadores com o equipamento apresentaram 17% de força a mais quando comparado sem o aparato, com significância estatística ( $p < 0,05$ ).

## Discussão

Esse estudo envolveu situações reais de trabalho, durante a operação normal de trabalho para estudar a eficiência dos equipamentos de exoesqueleto.

O estudo de Spada [8] que apresentou uma síntese do desenvolvimento do exoesqueleto de apoio de ombro pela empresa italiana Comau. Segundo esse estudo, o exoesqueleto foi usado em laboratório com 18 *team leaders* sadios e apresentou resultados positivos em 3 (16,66%) tipos de situações propostas: apoio dos ombros em atividades simples com os braços

acima dos ombros; elevação de carga de 3,4 kg desde o nível dos mamilos até um nível acima do nível dos ombros; e no trabalho de escrita em quadro acima do nível dos ombros [8]. O que encontramos em nosso estudo, das 6 atividades analisadas 2 (33,33%) apresentou significância estática com o exoesqueleto da marca Comau.

Segundo o estudo de Amandels [9] relataram a experiência de encorajar 9 trabalhadores de um setor de prensas e tesouras de uma empresa de manufatura a usarem exoesqueleto passivo durante 3 semanas, avaliando a tolerância e o potencial elétrico dos músculos com eletromiografia de superfície. As tarefas foram cuidadosamente selecionadas, segundo a recomendação do fabricante. O potencial elétrico dos músculos foi maior com o uso do exoesqueleto, refletindo maior esforço para se encurvar [9]. O que mostra que quando a atividade tem que fazer inclinação do tronco o esforço pode ser maior, por esse motivo, que é necessário um estudo ergonômico detalhado antes do uso do exoesqueleto.

As considerações sobre o exoesqueleto para o ombro do modelo Mate dentro dos aspectos ergonômicos foram as seguintes.

Dentro do aspecto físico biomecânico para os membros superiores:

- O exoesqueleto tem um sistema de impulsionamento para cima, que sustenta o peso do braço e facilita o movimento para cima. Dessa forma para atividade estática, onde o segmento fica parado sustentado em elevação, o sistema é muito eficiente, por diminuir o peso do segmento superior e facilitar o movimento. Já para atividade dinâmica, principalmente que envolva movimentos para baixo com o braço, o próprio sistema de impulsionamento para cima gera uma resistência ao movimento e conseqüentemente um esforço maior, como demonstrado no estudo Amandels [9]. Porém se a atividade for dinâmica com vetor de força para cima, o sistema auxilia e traz o benefício da sustentação do peso do segmento, diminuindo o esforço de manutenção contra a gravidade. Outro fator observado durante a atividade dinâmica, é que se essa for rápida e com mudanças bruscas de movimento em grandes amplitudes, o sistema articular do exoesqueleto não consegue acompanhar a velocidade humana causando “pequenos travamentos” durante o movimento e sendo um fator de risco, por poder gerar espasmos protetores nos músculos do trabalhador.

Dentro do aspecto Físico biomecânico para o tronco:

- O exoesqueleto tem uma haste protetora na coluna vertebral, auxiliando a sustentação durante atividade laboral em que o tronco fique neutro na posição ortostática (em pé), mas para atividades que exige flexão exagerada (inclinação anterior do tronco) essa haste leva a uma resistência, aumento o esforço, como ilustrado no estudo de Amandels [9] e pode gerar também atrito e ser um fator de risco, não sendo indicada para essas atividades.

Dentro do aspecto físico biomecânico para esforço:

- Ainda no aspecto físico o exoesqueleto aumentou a sudorese dos trabalhadores, dessa forma é importante orientar a reposição hídrica e fazer um acompanhamento com a perda iônica, para verificar a necessidade de reposição. Quanto ao esforço global, mesmo o exoesqueleto sendo um “peso a mais” para o trabalhador carregar, como ele diminui o esforço muscular durante as tarefas, esse apresentou um esforço leve (90 bpm) quando comparado com a mesma atividade sem o exoesqueleto que teve um esforço no limite de moderado para penoso (110 bpm).

Dentro do aspecto organizacional:

- O exoesqueleto requer um planejamento de tempo para colocar e retirar o aparato, além de ter cuidado com o espaço, pois o trabalhador ficará mais largo com o exoesqueleto do que o normal [10], cuidado com tropeços e quedas, pois o equipamento por ser uma massa adicional pode alterar o equilíbrio e a marcha em especial em maior velocidade. Em especial nas atividades desenvolvidas na empresa, que possui o sistema de Job Rotation, tem que se ter um planejamento para colocar o exoesqueleto nas atividades que tiveram comprovação científica e retirar para aquelas as quais o exoesqueleto não teve.

Dentro do aspecto cognitivo:

- O exoesqueleto requer um treinamento para que o trabalhador possa acostumar-se com o aparato externo e crie um mapa mental – *mind map*, para que a tarefa passa ser automatizada e sem esforços cognitivos devido o exoesqueleto.

As considerações sobre o exoesqueleto elástico para a coluna lombar modelo Morita Rakunie dentro dos aspectos ergonômicos foram as seguintes.

Dentro do aspecto biomecânico:

- O exoesqueleto tem um sistema elástico na parte posterior da perna (coxa) e da coluna vertebral, o que faz o seguinte com o trabalhador. Quando ele faz a inclinação anterior do tronco (flexão) ele contrai o músculo abdominal, condição ideal pois fortalece a parede abdominal, a cinta natural protetora da coluna lombar. Quando ele faz o retorno para a postura em pé neutra (extensão) os elásticos puxam o tronco, diminuindo assim a exigência muscular. Essa condição funciona bem com peso, uma vez que o exoesqueleto aumenta a força lombar do trabalhador como foi percebido, e em postura estática, mantida em inclinação anterior do tronco (flexão), situação não encontrada em atividade bem dinâmica do tronco. Dessa forma a aplicabilidade do exoesqueleto elástico é em atividade de levantamento de peso, lembrando que pelo princípio da ergonomia, sempre temos que adaptar o ambiente ao homem, propiciando o máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente, dessa forma atividade de levantamento de peso quando todas as alternativas de layout foram já esgotadas. Atividades de manutenção de postura estática em flexão (inclinação anterior do tronco).

Dentro do aspecto organizacional:

- O exoesqueleto mostrou pouca exigência, por ter facilidade na usabilidade durante colocar e retirar e no trabalho.

Dentro do aspecto cognitivo:

- O exoesqueleto requer um treinamento para que o trabalhador possa acostumar com o aparato externo e crie um mapa mental – *mind maps*, para que a tarefa passa ser automatizada e sem esforços cognitivos devido ao exoesqueleto.

## Conclusão

Considerando os resultados encontrados no presente estudo ergonômico sobre a eficiência do exoesqueleto biônico, do modelo Mate 1.0 Shoulder, esse mostrou eficiente para atividades estática acima de 4 segundos com o ombro elevado e para atividades dinâmica com vetor de força para cima.

Considerando os resultados encontrados no presente estudo ergonômico sobre a eficiência do exoesqueleto elástico, do modelo Morita Rakunie, esse mostrou eficiente para atividades estática acima de 4 segundos com o tronco fletido (inclinado para frente) e para atividade de levantamento de peso.

Considerando os resultados encontrados no presente estudo ergonômico sobre a eficiência de aparatos preventivos, como exoesqueleto elástico e biônico, podemos concluir que para real eficiência do sistema preventivo, por ser um sistema de controle dos riscos ergonômicos da tarefa, se faz necessário que siga o protocolo de aplicabilidade do exoesqueleto (anexo) para a obtenção de melhores resultados de forma segura e eficiente.

Considerando o princípio da ergonomia, onde temos sempre que adaptar o ambiente ao homem, propiciando o máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente. Os exoesqueletos são aparatos externos corporais que podem auxiliar na diminuição do esforço muscular como forma de atenuação de riscos biomecânicos em algumas atividades, desde que se faça um estudo detalhado para validar as atividades a serem aplicadas.

## Referências

1. Boita HB et al. Implantação de exoesqueleto em indústrias frigoríficas. Anais da Engenharia Mecânica 2018;3(2):58-73.  
<https://uceff.edu.br/anais/index.php/engmec/article/view/211>
2. Rempel DM, Star D, Barr A, Janowitz I. Overhead drilling: comparing three bases for aligning a drilling jig to vertical. J Safety Res 2010;41(3):247-51.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2010.01.003>
3. Rempel DM, Star D, Barr A, Blanco MM, Janowitz I. Field Evaluation of a modified intervention for overhead drilling. J Occup Environ Hyg 2010;7(4):194-202.  
<https://doi.org/10.1080/15459620903558491>
4. Rashedi E, Kim S, Nussbaum MA, Agnew MJ. Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. Ergonomics 2014;57(12):1864-74.  
<https://doi.org/10.1080/00140139.2014.952682>
5. Garcés DSC. Exoesqueleto robótico para aumentar a capacidade física do membro superior humano. [Dissertação]. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE; 2013.
6. <https://www.linkedin.com/pulse/indústria-50-o-exoesqueleto-muito-além-das-fronteiras-júnio/>
7. Hill D, Holloway CS, Morgado Ramirez DZ, Smitham P, Pappas Y. What are user perspectives of exoskeleton technology? A literature review. Int J Technol Assess Health Care 2017;33(2):160-7. <https://doi.org/10.1017/s0266462317000460>
8. Spada S et al. Passive upper limb exoskeletons: an experimental campaign with workers. Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA); 2018.
9. Amandels S et al. Introduction and testing of a passive exoskeleton in a industrial working environment. Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA); 2018.
10. Park D, Ortiz J, Caldwell DG. Novel mechanism of upper limb exoskeleton for weight support. Wearable Robotics: Challenges and Trends. Springer; 2019.

## Anexo

### Protocolo de aplicabilidade do exoesqueleto

Para se ter o uso com segurança, conforto e melhor desempenho de aparatos preventivos como exoesqueletos, se faz necessário ter um protocolo de aplicabilidade. Esse protocolo foi criado a partir de estudo bibliográfico e prático em campo sobre a usabilidade e eficiência do exoesqueleto em linha de produção. Ele será dado por passos a seguir instruídos:

**Primeiro passo:** Para o uso do exoesqueleto se faz necessário sempre, um estudo científico de cada atividade para ver a confiabilidade científica dele. Pois podemos verificar nesse presente estudo que mesmo atividades muito parecida como a de limpeza e de retirada da espuma, os resultados do exoesqueleto demonstraram diferentes tanto o equipamento para proteção do ombro, o exoesqueleto biónico, quanto o elástico para proteção da coluna lombar.

**Segundo passo:** Percebeu-se a necessidade de fazer um treinamento com o trabalhador para o correto uso, desde a colocação e os ajustes do aparato até a forma de operar e trabalhar. Esse treinamento tem que ser feito exclusivamente por um profissional que entenda a biomecânica e a ergonomia como por exemplo Fisioterapeuta do trabalho/Ergonomista. Esse treinamento tem que ser dado respeitando os seguintes passos:

- Treinar as técnicas de colocação do exoesqueleto, seguindo as orientações do fabricante. Isso garantirá a segurança do trabalhador e o melhor uso do equipamento aumento assim sua vida útil.
- Marcar o tempo para colocar e retirar o exoesqueleto, isso dará o tempo médio para a organização da tarefa em especial em caso de Job Rotation.
- Fazer um treinamento de marcha em dois níveis de velocidade: normal e rápida (em caso de evacuação urgente da fábrica).

- Fazer um treinamento cinesiológico funcional para que o trabalhador aprenda a usar o exoesqueleto de maneira automática, aprendendo a fazer os movimentos aproveitando os benefícios dos exoesqueletos, permitindo que o aparato auxilie o movimento, diminuindo o esforço muscular. Esse treinamento tem que ser feito em laboratório, uma sala separada aprendendo os movimentos que são beneficiados com o equipamento e depois em campo, no posto de trabalho.
- O período de treinamento deve ser em média de 15 dias, período o qual o organismo vai tendo a formação do mapa neural – mind map. O período de treinamento no posto de trabalho deve ser gradativo, com uma evolução de uma hora por dia.

**Terceiro passo:** Criar um processo de usabilidade da seguinte forma:

- Ter um suporte na operação para poder colocar o exoesqueleto biônico (modelo Mate 1.0 – Shoulder) quando não for utilizado;
- Treinar o procedimento de segurança, em caso de evacuação de emergência, de acordo com o tempo de retirada do exoesqueleto, orientar junto com a segurança, o que seria mais recomendável, sair vestido com o exoesqueleto ou tira-lo para sair da fábrica.
- Orientar ao trabalhador que comunique a ergonomia e/ou a saúde e segurança do trabalho qualquer modificação no comportamento do aparato, bem como em qualquer incomodo que o mesmo possa causar no trabalhador.

**Quarto passo:** Seguir rigorosamente o manual do fabricante, principalmente quanto a manutenção do equipamento, a fim de aumentar a vida útil do equipamento e não levar risco a saúde do trabalhador.

**Quinto passo:** Fazer avaliações periódicas sobre os efeitos do exoesqueleto nos trabalhadores a cada 6 meses para comparar com os resultados encontrados nesse estudo e criar uma linha de referência ao longo do tempo.

**Sexto passo:** Fazer uma reciclagem do treinamento a cada pelo menos 6 meses.