

ESTUDO DE METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DA FORÇA DECORRENTE DA QUEDA DE UM OPERÁRIO EM UM SISTEMA COM LINHA DE VIDA HORIZONTAL FLEXÍVEL E TALABARTE COM ABSORVEDOR DE ENERGIA

Lorenzi Moreira de Freitas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, lorenzi.freitas@gmail.com
Herbert Martins Gomes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, herbert@mecanica.ufrgs.br

Resumo. Este trabalho busca analisar uma metodologia para encontrar a força decorrente de queda de um operário da construção civil em um sistema de proteção ativa contra quedas com linha de vida horizontal flexível e talabarte com absorvedor de energia. O sistema considerado é composto por dois tubos estaiados, um cabo de aço para a linha de vida e um talabarte duplo com absorvedor de energia. Para isto foi encontrada uma equação para a força máxima durante a queda a partir de um sistema massa-mola equivalente. Foram feitos ensaios experimentais de quatro modelos (de três fabricantes diferentes) de talabartes para se encontrar a rigidez equivalente do sistema. Os resultados apontaram que a força de acionamento do absorvedor de energia foi atingida mesmo para valores baixos dos fatores de queda e considerando a rigidez do sistema de ancoragem. Como resultado, foi observado que a consideração de que a força permaneça constante a 6kN, independente da altura de queda, apresentou-se viável pois resultou em força próxima ao resultado que é considerado adequado. As principais contribuições do trabalho são: equações com significado dimensional e físico com dados obtidos em ensaios experimentais em talabartes disponíveis no mercado e a possibilidade do cálculo e avaliação da abertura do talabarte.

Palavras chave: Força de queda, Sistema de proteção ativa contra quedas, Linha de vida horizontal flexível, Talabarte com absorvedor de energia.

1. INTRODUÇÃO

A situação da segurança e saúde no trabalho no Brasil apresenta um grande desafio a ser enfrentado. Segundo o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE): “Somente em 2002, o Ministério da Previdência Social registrou 387.905 acidentes e doenças relacionadas com o trabalho, dentre os quais 2.898 resultaram em óbito e 15.029 tiveram como consequência a incapacidade permanente do trabalhador. [MTE, 2012, p. 42]”. Um dos fatores que levam a este cenário é a grande diversidade de atividades econômicas que vão da agricultura familiar, com suas práticas elementares de trabalho, até tipos de produção que envolvam técnicas mais sofisticadas, como a de aviões e foguetes. Outro fator é a falta de compreensão das diferentes partes interessadas sobre as relações que podem afetar a segurança e saúde dos trabalhadores. “Dentre os acidentes fatais, as quedas de altura representam uma alta proporção em relação ao total de casos. [...] das análises de acidentes ocorridos no estado do Rio Grande do Sul revelam que as quedas de altura representam mais de 30% do total de acidentes fatais. Na indústria da construção, a proporção das fatalidades por quedas é maior, constituindo mais de 50% do total de acidentes fatais nesta atividade.” [Branchtein, 2015, p.159]. Branchtein (2012) cita que os fatores causais são: falta de planejamento do trabalho; procedimentos de trabalho inexistentes; falta ou inadequação de análise de risco da tarefa; ausência de projeto; meio de acesso temporário inadequado; insuficiência de supervisão; insuficiência de treinamento; modo de operar perigoso; trabalho habitual em altura sem proteção contra queda; terceirização.

Neste contexto, os sistemas de proteção que visam prevenir as quedas em altura ou reduzir suas consequências são de grande importância. Diversos tipos com este mesmo fim são utilizados em diversos setores econômicos. Porém estes projetos que envolvem a redução das consequências da queda apresentam uma complexidade extra, por terem que limitar a força transferida para o trabalhador e terem que resistir a altas cargas na sua estrutura, isto tudo envolvendo esforços dinâmicos nos seus componentes. Este trabalho buscará estudar uma metodologia para o cálculo da força máxima decorrente da queda de um operário da construção civil. O sistema escolhido foi o de proteção ativa contra quedas com linha de vida horizontal flexível.

2. SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA QUEDAS

Os sistemas de proteção ativa contra quedas (SPAQ) são classificados de dois modos segundo Branchtein (2015): pelo tipo de proteção (ativa ou passiva) e pelo tipo de restrição (restrição do movimento e retenção da queda). A proteção ativa é aquela que depende da ação do trabalhador e corresponde a um equipamento de proteção individual (EPI). Por isso são dependentes de medidas extras como treinamentos específicos para garantir a sua eficácia. Exemplo deste tipo é uma linha de vida. Já a proteção passiva independe da ação do trabalhador, corresponde a um equipamento de proteção coletiva (EPC), por esta razão são preferíveis aos de proteção ativa. Exemplos são: as redes de segurança e sistemas de guarda-corpo e rodapé.

Vale ressaltar que um sistema pode ser projetado para a restrição de movimentação e acaba sendo exigido (por falha no projeto, na instalação ou na utilização) como um que retenha a queda. Linhas de vida se enquadram neste contexto, acarretando em situações de grande risco, pois os sistemas de restrição de movimentação não são projetados para resistir às forças de impacto como nos sistemas de retenção de queda.

3. DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE QUEDA

A análise do sistema utilizará conceitos de sistemas dinâmicos, mais especificamente os estudos de vibrações mecânicas. Segundo Rao (2009), “qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação [Rao, 2009, p.6]”. Exemplos deste fenômeno são as movimentações de um pêndulo ou de um sistema massa-mola. Para a determinação da força de queda, é feita uma metodologia onde primeiro é estabelecido um modelo com os fatores a serem inclusos, depois é encontrada a equação que rege o comportamento e após é encontrada a solução com suas constantes pertinentes.

3.1. Metodologia de cálculo da força

A metodologia foi baseada no que Goldstone (2015) apresenta, que é o de dividir o problema em duas etapas: queda-livre e desaceleração. Desta forma, o primeiro caso, será analisado a queda-livre do operário caindo até que ele atinja a distância de queda, após isto ele será desacelerado pela mola, segundo caso.

No primeiro caso, a única força atuante é a força gravitacional. Já no segundo, há duas forças em sentidos opostos, uma é a força gravitacional e a outra é a força decorrente da deformação da mola. Com isto é possível encontrar a força resultante na massa e assim encontrando o seu valor máximo, conforme Freitas (2015), resultando na Equação (1).

$$F_c = m \cdot g \left[\sqrt{1 + \frac{2 \cdot d_q \cdot k}{m \cdot g}} \right] \quad (1)$$

onde: F_c : Força máxima atuante no corpo [N]; m : massa [kg]; g : aceleração da gravidade [m/s^2]; d_q : distância de queda [m]; k : rigidez do sistema [N/m].

3.2. Modelos comparativos

Para a comparação dos resultados, serão utilizados 2 modelos: o primeiro limita a força pela especificação do talabarte e o segundo é uma formulação que depende de diversos fatores que contribuem para a força. O primeiro modelo comparativo é baseado no que é apresentado por Branchtein (2015), neste a força é constante, valendo 6kN. Esta é a força de frenagem máxima para o trabalhador que a norma NBR 14629 exige, como já referido.

O segundo modelo é uma formulação elaborada por Sulowski (1981, apud Ellis 1993). Diferentemente do primeiro, esse leva em consideração diversos fatores, como: módulo de corda (k_c), fator de queda (f_q), massa e fatores adimensionais. Esse é descrito pela Eq. (2), que segue:

$$F_s = m \cdot g + 4,5 \sqrt{k_c \cdot f_q \cdot m} \cdot \frac{a \cdot b \cdot s}{c} \quad \text{onde} \quad f_q = \frac{d_q}{H_{ta}} \quad (2)$$

onde: F_s : Força máxima de impacto por Sulowski [N]; f_q : Fator de queda [adm.]; k_c : Módulo de corda [N]; a : Fator de redução do trava-quedas [adm.]; b : Fator de redução do dispositivo de absorção corporal, cinto de segurança [adm.]; s : Fator de redução do absorvedor de energia [adm.]; c : Fator de conversão peso rígido/manequim [adm.]; H_{ta} : Comprimento do Talabarte [m].

4. ESTUDO DA RIGIDEZ DO SISTEMA

Pela Eq. (1), a força máxima é dependente da rigidez do sistema. Para isto foi elaborado o diagrama completo de corpo livre do sistema, Figura (1). Nele é possível ver os todos os componentes estudados. Para a obtenção da rigidez, esse foi transformado em um sistema massa-mola, onde cada elemento é representado por uma rigidez específica.

A numeração da Fig. (1) corresponde aos seguintes elementos: estaio do tubo (1 e 8), tubo de sustentação (2 e 7), cabo de aço da linha de vida (3 e 6), fita do talabarte (4) e absorvedor de energia (5). Os elementos 1, 2, 3, 6, 7 e 8 (referentes ao sistema de ancoragem) estarão sempre na região elástica. Já os elementos 4 e 5 (referentes ao talabarte) serão considerados primeiramente na região elástica e, depois, na região dissipativa. No ensaio de tração do talabarte, a primeira região é a da fase elástica, caracterizada pela linearidade da força em relação ao alongamento ou da tensão com

a deformação. Já a rigidez dissipativa é quando o absorvedor de energia está atuando (abrindo), fazendo com que a força máxima seja limitada, dissipando a energia cinética da queda.

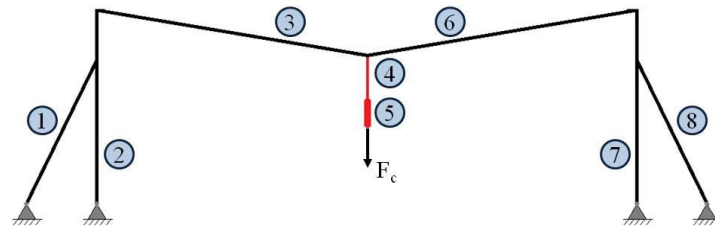


Figura 1. Diagrama de corpo livre considerado para o sistema da linha de vida.

Para análise da rigidez na fase dissipativa do talabarte, foi utilizada uma metodologia que considera o efeito decorrente da atuação do absorvedor de energia. Isso foi feito com base nos resultados dos ensaios de tração nos elementos. O equacionamento foi baseado pela transformação da energia potencial gravitacional, Eq. (3), em energia potencial elástica da mola, Eq. (4), estas seguem:

$$E_{pg} = m \cdot g \left(dq + \sum \delta \right) \quad (3)$$

$$E_{pe} = \sum \frac{k_{eq,d} \cdot \delta^2}{2} \quad (4)$$

onde: E_{pg} : Energia potencial gravitacional [J]; E_{pe} : Energia potencial elástica da mola [J]; δ : Alongamento do elemento [m]; $k_{eq,d}$: Rigidez equivalente na região dissipativa [N/m].

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para conhecermos o comportamento do sistema, foram feitos ensaios de tração em talabartes de três fabricantes diferentes (denominados marca A, B e C). Primeiro foi estudado o talabarte duplo (ensaio chamado de conjunto), depois foi visto comportamento dos elementos separados (fitas e absorvedor de energia), os outros elementos (ganchos e mosquetão) não foram considerados, pois sua rigidez é mais elevada. Estes são exibidos na Figura (2).

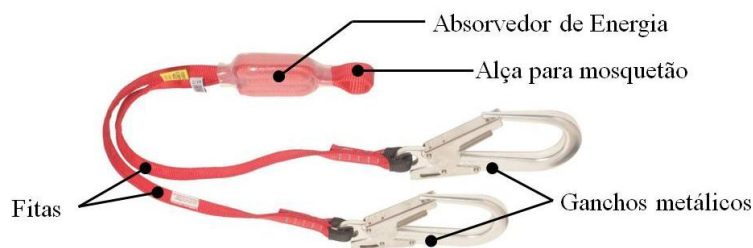


Figura 2. Elementos de um talabarte duplo. Fonte: Ultrasafe [2016] (imagem modificada).

O objetivo prioritário era ensaiar o conjunto (fita e absorvedor de energia juntos) nos quatro modelos estudados (dois da marca A, um da B e um da C), mas as garras da máquina possui uma faixa de deslocamento que limitaria o alongamento do talabarte. Então foram feitos ensaios dos elementos separados e, para comparação de resultados, um modelo foi ensaiado das duas formas e visto as diferenças dos resultados.

6. RESULTADOS E ANÁLISE

Os ensaios do conjunto foram feitos em dois modelos, ambos da marca A, um modelo que não é mais fabricado e outro que é mais atual (Ensaio 1 e 2, respectivamente). Na Fig. (3.a) que apresenta o caso do Ensaio 1, é possível ver que uma primeira região com um crescimento de força até que entre em um regime cíclico. A primeira região será regida pelas equações da fase elástica, esta vai até que a força atinja a carga de acionamento do absorvedor. A segunda região é onde o absorvedor atua, ele permite que algumas de suas fibras se rompam, limitando a força e aumentando o alongamento. No ensaio é possível notar que há sucessivos aumentos e quedas de força, criando ciclos. Observa-se, também, que a força de frenagem máxima exigida pela norma NBR 14629, 6kN, não foi atingida em nenhum momento.

Para cada marca analisada foi feito um ensaio com absorvedores de energia (Ensaio 3, 5 e 7). A Fig. (3.b) apresenta o caso do Ensaio 5, é possível ver que o comportamento é semelhante ao ensaio do conjunto: uma primeira região com um crescimento de força até entrar em um regime cíclico. Diferencia-se por seu alongamento e pelos picos de força, ambos superiores aos vistos no Ensaio 1, Figura (3.a). Já os ensaios das fitas, um para cada marca (Ensaio 4, 6 e 8), é possível observar que o comportamento é diferente aos anteriores: há um crescimento contínuo da força com o alongamento até o seu rompimento abrupto, a Fig. (3.c) apresenta o caso do Ensaio 8,.

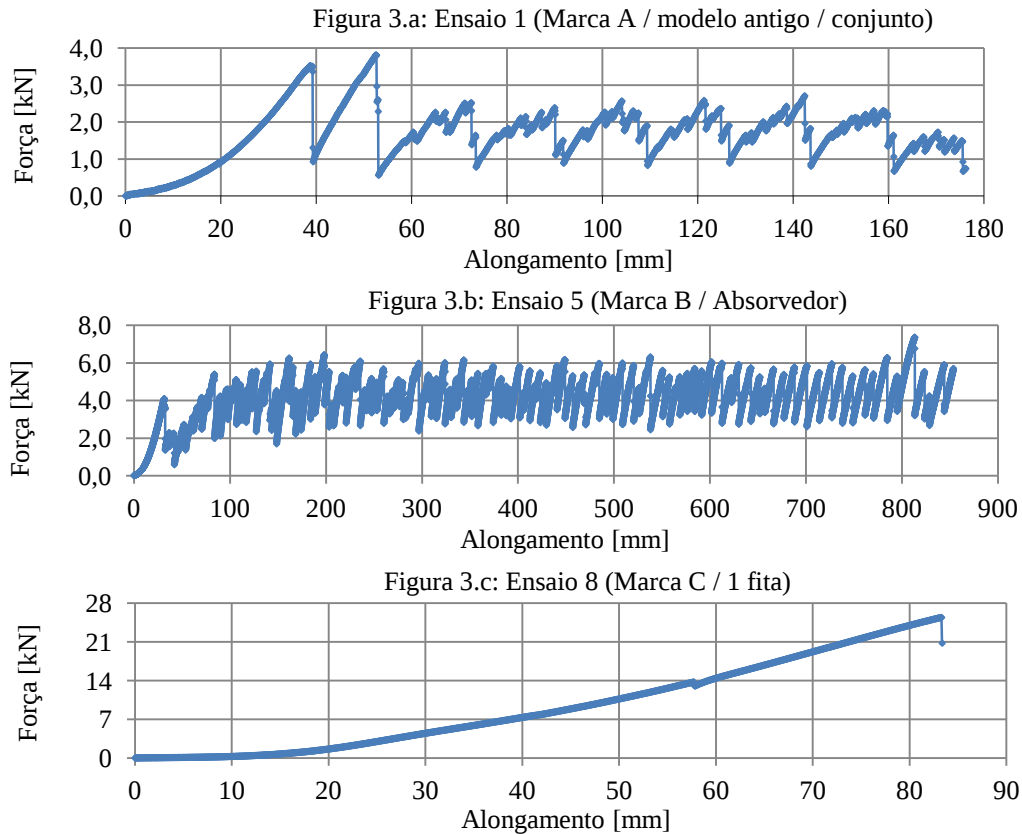


Figura 3. Comportamento da força pelo alongamento dos ensaios: 1 (Figura 3.a), 5 (Figura 3.b) e 8 (Figura 3.c).

A rigidez do talabarte na fase elástica foi obtida selecionando-se uma região linear do ensaio e com ela é calculada a sua reta de regressão. Os resultados dos módulos de elasticidade dos talabartes apresentaram resultados com média de 153 kN/m. Considerando a rigidez do suporte a rigidez equivalente teve uma queda de, aproximadamente, 46,5% (média de 81,8 kN/m). Os resultados estão na Figura (4).

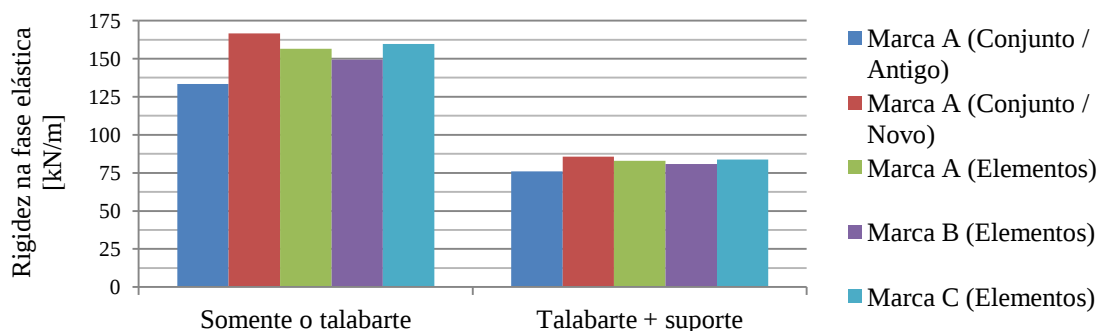


Figura 4. Rigidez na fase elástica resultante dos ensaios.

6.2. Resultados de força e deslocamento

A verificação para certificar-se que o ponto estará na fase elástica ou dissipativa é feita pela equação da força, Equação (1). A Fig. (5) apresenta o comportamento da força de queda em função do fator de queda de apenas dois

resultados dos ensaios (o que apresentou a maior e a menor rigidez, desta forma os outros resultados se situam entre as linhas) e, também, é apresentada a consequência de se considerar a rigidez do sistema de ancoragem. Considerou-se a massa exigida pela norma (NBR 14629), 100 kg. Os resultados serão apresentados em função do fator de queda, Equação (2). A distância de queda será variada pela altura da linha de vida, os outros fatores serão mantidos fixos.

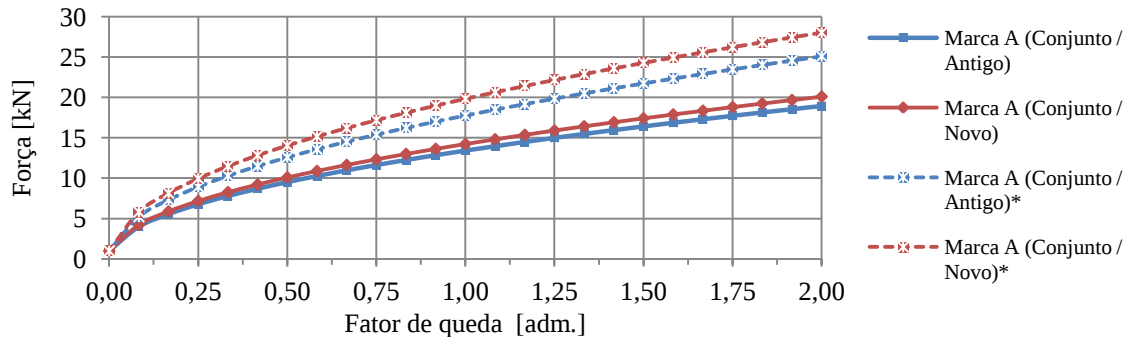


Figura 5. Força considerando a rigidez na fase elástica resultante dos ensaios. *Sem considerar a rigidez do ancoragem.

A Fig. (5) mostra que a força de queda cresce com o fator de queda. Nota-se que há uma queda da força no sistema que considera a rigidez do suporte, em relação ao que não faz essa consideração. Mas o principal ponto a ser ressaltado é que mesmo para valores baixos de fator de queda (consequentemente distância de queda) já foi atingido o valor de acionamento do absorvedor de energia (considerado 3kN), sendo que isso foi observado em todos os casos estudados. Desta forma teve-se que calcular uma rigidez equivalente em função do fator de queda para cada caso. Diferentemente da rigidez da fase elástica, onde se obteve cinco resultados, apenas dois resultados de rigidez da fase dissipativa foram concluídos pela metodologia aplicada, pois dois modelos foram excluídos: antigo da marca A (pois este apresentou uma absorção de energia muito baixa) e o da marca C (pois o seu absorvedor de energia apresentou um defeito durante o ensaio na fase dissipativa). Desta forma foi calculada a rigidez na fase dissipativa para diversos fatores de queda para o modelo novo da marca A (Ensaio 2) e para o da marca B (Ensaio 5 e 6). O comportamento da rigidez foi decrescente, partindo do valor de rigidez da fase elástica e acabando em valores próximos a 20 kN/m para a marca A e 7 kN/m para a marca B. Nela também é possível notar que a rigidez chega a valores bem mais baixos que a rigidez do suporte. Por esta razão ela não foi considerada na fase dissipativa. Comparativamente com o talabarte ela tem uma rigidez bem mais elevada, pouco alongamento e pouca absorção de energia. Aplicando estes resultados na Eq. (1), chega-se ao comportamento da força mostrado na Figura (6).

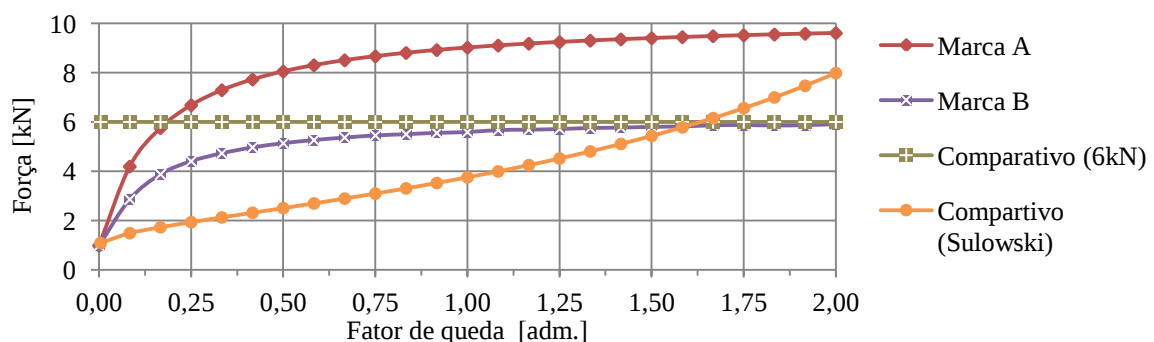


Figura 6. Resultado da força pelo fator de queda.

Na Fig. (6) já estão exibidos os comparativos propostos na seção 3.2. Um deles mantém a força constante em 6kN, enquanto o outro foi baseada na metodologia apresentada por Ellis (1993), baseada em Sulowski, ela mostrou um aumento da força quase linear com o aumento do fator de queda, saindo da força peso e chegando a 8kN. O comportamento dos dois resultados obtidos pelos ensaios se mostraram semelhantes: saindo da força peso e tendendo a uma força, respectivamente de 9,7 para a Marca A e de 6kN para a Marca B, com o aumento do fator de queda. Eles apresentaram coerência com os resultados de força pelo alongamento obtidos nos ensaios, onde é possível ver que, a partir do acionamento do absorvedor de energia, a força tende a se manter. Desta forma o talabarte novo da Marca A apresentou uma força superior ao exigido pela NBR 14629 (máximo de 6 kN), enquanto o da Marca B ficou dentro, sendo que isto também foi observado nos seus ensaios. Com esta metodologia foi possível calcular o alongamento, que

por sua vez trouxe uma melhoria para a estimativa do cálculo da zona livre de queda. Sem isso, é necessário que se considere a abertura máxima do absorvedor de energia, o que faz com que esta fique em uma faixa de 4 até 5,5m.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou desenvolver equações com significado dimensional e físico, buscando os dados necessários em experimentos para prever o comportamento de talabartes disponíveis no mercado. Outra contribuição foi a possibilidade de cálculo da abertura do talabarte, melhorando a estimativa da zona livre de queda. No contexto da construção civil brasileira é que este trabalho ganha relevância, pois contribui para os projetos com uma metodologia para o cálculo da força decorrente da queda de um operário em um sistema de proteção ativa contra quedas com linha de vida horizontal flexível e talabarte duplo com absorvedor de energia. Da análise dos resultados, pode-se verificar que: (a) A força decorrente da fase elástica alcançou a força de acionamento do absorvedor de energia, mesmo para valores baixos fatores de queda. A consideração da rigidez do sistema de ancoragem fez com que a força diminuísse, mas o comportamento geral observado se manteve; (b) Os comportamentos dos talabartes ressaltaram a necessidade de uma análise muito cuidadosa, com uma seleção de equipamentos, condições de uso, manutenção e parâmetros de projetos bem estudados, pois as forças são muito elevadas e um defeito poderá ocasionar em um acidente fatal; (c) O modelo proposto (com força constante de 6kN), apresentou um resultado de força próximo ao da Marca B, principalmente a partir do fator de queda 1. Já o baseado no modelo de Sulowski, Eq. (2), apresentou um comportamento quase linear, divergindo dos demais. Esse resultado foi ao encontro do que Branchtein (2015) comenta: "...a equação poderá trazer resultados errados, pois ela não foi baseada nos talabartes utilizados no Brasil e por não seguir a metodologia estipulada."; (d) A metodologia possibilitou o cálculo da abertura do talabarte (alongamento) e com isto pode-se estabelecer uma zona livre de queda (ZLQ) até 2m menor que a que considere a abertura máxima do absorvedor de energia do talabarte.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14629: Equipamento de proteção individual contra queda de altura — Absorvedor de energia**. Rio de Janeiro, 2011.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Albuquerque, V. L. R.; “**Segurança e Saúde no Trabalho, Relatório de avaliação do plano plurianual 2008-2011**”. Brasília, 2012. Disponível em: <http://acesso.mte.gov.br/data/files/8A7C812D39B0462E0139BB870C57539C/Caderno_Setorial_2011_com_capa.pdf>. Acesso em: 28 de junho de 2016.

BRANCHTEIN, Miguel Coifman. “Projeto de Sistema de Proteção Individual de Captura de Quedas”. In: **II semana da saúde e da segurança do trabalho (TECPUC, 2, 2012)**. Jaraguá do Sul. Disponível em: <<http://wikitrabalho.agitra.org.br/sst>>. Acesso em: 09 de setembro de 2015.

_____; de Souza, Giovani Lima; Simon, Wilson Roberto. Sistema de Proteção Ativa Contra quedas com Linha de Vida Horizontal Flexível. In: Filgueiras, Vitor Araújo (Org.). “**Saúde e Segurança do Trabalho na Construção Civil Brasileira**”. Aracaju: Ministério Público do Trabalho; Procuradoria do Trabalho da 20ª Região – Sergipe. p. 159-192.

ELLIS, J. Nigel. “**Introduction to fall protection**”. 2nd ed. Des Plaines, Illinois: American Society of Safety Engineers, 1993. 228 p.

FREITAS, Lorenzi Moreira de. “**Estudo de metodologia para o cálculo da força decorrente da queda de um operário em um sistema com linha de vida horizontal flexível e talabarte com absorvedor de energia**”. 2016. 83 f. Trabalho de Conclusão (Especialização em Segurança do Trabalho) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

GOLDSTONE, Richard. The standard equation for impact force. **Manhattan College, Department of Mathematics and Computer Science**, Nova York, 2006. Disponível em: <<http://wikitrabalho.agitra.org.br/sst>>. Acesso em: 09 de setembro de 2015.

RAO, Singiresu S. “**Vibrações mecânicas**”. 4 ed. São Paulo: Pearson, 2009.

UTRASAFE. SDE DUPLO. Disponível em: <<http://www.ultrasafe.com.br/talabarte-duplo-mgo.html>>. Acesso em: 08 de agosto de 2016.

9. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da CAPES e do CNPq para a realização deste trabalho.

10. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.