

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
RIO GRANDE DO SUL
Câmpus Farroupilha

ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA DE ANCORAGEM PARA LINHAS DE VIDA FLEXÍVEIS HORIZONTAIS

Ivan Miguel Buco, ivanm.bucco@gmail.com - Discente

Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br - Orientador

Alexandre José Bühler, alexandre.buhler@farroupilha.ifrs.edu.br - Coorientador

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha

Resumo: *O propósito do presente trabalho é analisar o comportamento de um sistema de linhas de vida flexíveis horizontais durante quedas de diferentes alturas, ou seja, diferentes fatores de queda, através de uma análise teórico-experimental, a partir da análise da rigidez do sistema de ancoragem. Esse tipo de linha de vida é amplamente utilizado em edificações de todos os tipos, tanto industriais como residenciais, para evitar que trabalhadores ao executar trabalhos em altura sofram acidentes decorrentes de quedas. Tendo em vista a importância da segurança dos trabalhadores, foi desenvolvido um método para analisar o comportamento das linhas de vida de acordo com a variação da rigidez da estrutura. O modelo foi avaliado de forma analítica, posteriormente, analisado e validado através de testes práticos utilizando-se um ensaio de queda. A partir dos dados obtidos através dos testes e dos cálculos propostos é possível compreender o comportamento do sistema.*

Palavras-chave: *linhas de vida, segurança do trabalho, teste de queda, proteção contra quedas;*

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo o Ministério do Trabalho e Emprego as quedas com diferença de nível representaram 10,6% dos registros de acidentes de trabalho no ano de 2017 (Sampaio, 2018). Segundo dados do INSS, das 349.579 Comunicações de Acidentes de Trabalho (CATs) entregues em 2017 referentes a acidentes típicos e doenças, 37.057 foram relacionadas à quedas. As quedas com diferença de nível chamam atenção pela gravidade. Quando contabilizados os acidentes fatais de trabalho, esses acidentes respondem por um percentual ainda maior, 14,49% do total. No ano de 2017, 161 das 1.111 mortes em ambiente de trabalho foram causadas por esse tipo de ocorrência.

Sabe-se da importância de assegurar a proteção dos trabalhadores nos ambientes de trabalho ou durante a prestação de serviços. Cada vez mais as empresas têm se mostrado dispostas a investir em meios para garantir que não aconteçam acidentes e, se caso ocorram, não tenham consequências para os trabalhadores envolvidos. Quando se fala no trabalho em altura, são abordados diversos sistemas de segurança envolvidos, que partem desde o treinamento do colaborador até um sistema eficiente de proteção contra queda. Um dos sistemas de segurança à queda mais utilizados corresponde as linhas de vida horizontais flexíveis.

O que a legislação determina, a exemplo da NR 01, NR 18 e NR 35, é que a empresa deve assegurar todas as medidas de proteção necessárias para preservar a integridade física e a saúde dos trabalhadores. Deve ser realizada a análise de risco para cada atividade ou etapa, com a identificação dos fatores de risco envolvidos na atividade e as medidas de controle necessárias para a eliminação da exposição do trabalhador ao risco de queda durante a execução de trabalhos em altura.

As linhas de vida horizontais flexíveis vêm sendo estudadas desde a década de 70, sendo capazes de demonstrar a existência de vários fatores que influenciam no comportamento do sistema (Galy e Lan, 2017), embora existam tópicos ainda não muito explorados pela comunidade científica, como a rigidez do sistema de ancoragem. Galy e Lan (2017) propuseram um método analítico para o projeto deste tipo de linha de vida considerando as ancoragens flexíveis, analisando os resultados juntamente com ensaios experimentais analisando aspectos como energia dissipada pelo absorvedor de energia do talabarte e da

deformação do pilar do sistema de ancoragem. De acordo com o método numérico proposto pelos autores, fica demonstrado que uma rigidez maior dos pilares provoca uma tração maior no cabo e a redução da deflexão na linha de vida.

Um estudo elaborado comparando um programa computacional desenvolvido e ensaios realizados em laboratório foi proposto por Baszczynski e Zrobek (2000). O estudo apresenta uma linha de vida ancorada rigidamente a uma estrutura, não possuindo pilares para a ancoragem, o que resulta em uma rigidez mais elevada do sistema. Os resultados em termos da carga máxima de parada, força atuante nos pontos de ancoragem e a altura total da queda, mostraram que o algoritmo desenvolvido obteve resultados semelhantes aos encontrados experimentalmente.

Branchtein (2013), por sua vez, elaborou um estudo voltado para a avaliação de um projeto de linha de vida considerando a elasticidade de alguns componentes. O estudo levou em consideração as elasticidades do talabarte, da linha de vida e da ancoragem. Nesse caso a força que realmente estará atuando no sistema de ancoragem será menor, devido à absorção de energia por todos os elementos do sistema.

Coco e Fernandez (2016) realizaram uma avaliação da influência do tamanho do vão e da posição de trabalho do operário em relação à linha de vida. Nessa avaliação, foi possível averiguar que, como a NR-35 propõem, a linha de vida deve estar na altura da cintura do trabalhador ou acima dela. Caso contrário haverá uma carga excessiva sobre o corpo da pessoa, podendo tornar-se um grave acidente. Outro ponto importante observado foi a variação da flecha formada no cabo durante a queda, que sofre um aumento significativo de acordo com o aumento do vão da linha de vida.

Vários estudos já foram realizados na área, propondo maneiras diferentes para a obtenção de conclusões analíticas e experimentais. Um guia publicado em 1991 pelo IRSST (*Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail*) apresenta um método simples para o projeto de linhas de vida horizontais (Arteau e Lan, 1991). O guia sugere que a força máxima nos pontos de ancoragem acontecerá com o carregamento no centro do vão, conforme estudos realizados anteriormente (Dayawansa et al., 1989; Sulowski and Miura, 1983). De acordo com esse método, para o sistema estático e simétrico, o cálculo da curvatura do cabo sob seu próprio peso aproxima, a curva da catenária por uma parábola.

Pode-se observar que em nenhum dos trabalhos citados se observou a influência da rigidez do sistema de ancoragem no desempenho da linha de vida. Esta é uma análise relevante a ser considerada, tendo influência direta na atuação e construção das linha de vida flexíveis horizontais, colaborando para que se atinja os requisitos determinados pela NBR 14629 que determina que a força máxima transmitida ao trabalhador seja de 6 kN.

No presente trabalho será apresentado um estudo e desenvolvimento de componentes para ancoragem de linhas de vida. O projeto foi realizado juntamente com a Pró-Ação Engenharia, empresa que atua no ramo de soluções em engenharia com foco na área de segurança do trabalho, englobando o desenvolvimento de soluções para trabalhos em altura. A empresa está há mais de 15 anos no mercado, sendo reconhecida pelo trabalho desenvolvido. Para o correto dimensionamento de um sistema de ancoragem, foram executados testes de queda, com a finalidade de verificar se os esforços envolvidos durante uma simulação de queda estão de acordo com o que foi proposto durante a fase de projeto, através de métodos analíticos, e proporcionar uma análise detalhada e mais adequada para a construção dos sistemas de ancoragem.

1.1. SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA QUEDAS

Segundo Branchtein (2015), os sistemas de proteção contra quedas são classificados de dois modos: proteção ativa ou proteção passiva e pelo tipo de restrição, podendo restringir o movimento ou reter a queda. Podem ser utilizadas diversas formas para se chegar à uma solução eficiente e eficaz para a proteção contra quedas. Elas podem ser construídas de forma a proteger coletivamente ou individualmente, sendo preferível a utilização de sistemas de proteção coletiva quando for viável. Um exemplo muito comum de sistemas de proteção coletiva são os guarda-corpos, porém esse tipo de solução não é viável em locais em que não há circulação constante de pessoas.

Em situações em que o acesso de público não é frequente mas que faz-se necessário o acesso de trabalhadores, como por exemplo em manutenções de sistemas instalados em telhados ou pintura das edificações, é obrigatório a utilização de sistemas de proteção contra queda. Podem ser construídos diversos tipos das chamadas linhas de vida. A mais comum é a linha de vida flexível horizontal que pode ser observada na figura 1, a qual consiste em um cabo de aço preso em ancoragens fixas à estrutura da edificação, podendo ter um ou mais vãos de acordo com a necessidade, de acordo com a NBR 16325-1 e NBR 16325-2.

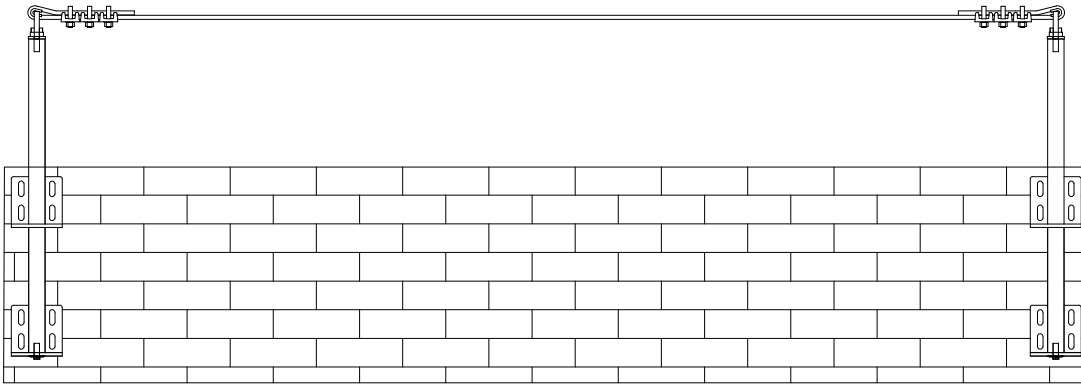


Figura 1: Linha de vida flexível horizontal (Fonte: Dados próprios)

Para o desenvolvimento de sistemas de proteção contra queda, devem ser dimensionados e selecionados diversos componentes utilizados, como:

Talabartes: em sistemas de retenção de quedas deve atender a NBR 15834 ou a NBR 15835, e deve ser selecionado conforme as exigências do projeto. As principais características a serem vistas são: comprimento (podendo ser regulável), existência de absorvedor de energia incorporado ao talabarte (no formato simples ou duplo, em Y), tamanho do gancho compatível e material das fitas.

Cabo flexível: sistema composto de um cabo flexível, como um cabo de aço, com conectores em ambas as extremidades, para fixá-lo horizontalmente entre duas ancoragens ou conectores de ancoragem.

Ancoragens: Componentes definitivos ou temporários, dimensionados para suportar impactos de queda, aos quais o trabalhador possa conectar seu equipamento de proteção individual, diretamente ou através de outro dispositivo, de modo a que permaneça conectado em caso de perda de equilíbrio, desfalecimento ou queda.

Mosquetão: É um anel metálico que possui um segmento móvel, chamado gatilho, que se abre para permitir a passagem da corda e do cabo de aço. É um equipamento típico de uso em trabalho em altura com a utilização de cabos sintéticos.

Sapatilha: É um acessório desenvolvido como elemento de proteção, que evita a deformação de cabos e desgastes de cordas em sua conexão com o sistema de ancoragem.

Cabe lembrar que o absorvedor de energia individual acoplado ao talabarte deve atender a NBR 14629. Esta norma o define como componente ou elemento de um sistema anti quedas projetado para dissipar a energia cinética desenvolvida durante uma queda. De acordo com a norma, o absorvedor de energia deve permitir que a força máxima de frenagem seja de no máximo de 6 kN.

Conforme apresentado por Freitas (2019), o sistema de ancoragem (ver figura 2), é responsável por fazer a ligação do cabo de aço da linha de vida horizontal com a estrutura da edificação. O sistema de ancoragem é comumente fixado através de porcas e parafusos. Este sistema deve garantir a segurança em caso de queda, podendo deformar-se ou não. Podem ser utilizados também sistemas que integrem absorvedores de energia na própria ancoragem com finalidade de diminuir o impacto sobre o trabalhador em caso de queda. Os sistemas de ancoragem devem ser construídos e testados em um ensaio de queda de acordo com a NBR 16325-1 e NBR 16325-2 para garantir sua eficácia em proteger o trabalhador caso ocorra uma queda durante a execução de trabalhos em altura.

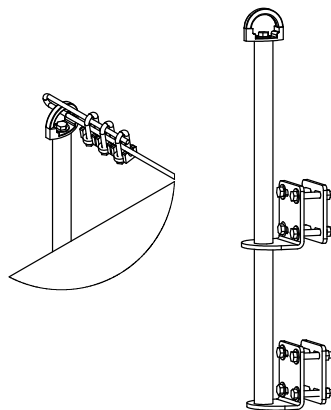


Figura 2: Sistema de ancoragem (Fonte: Pró-Ação Engenharia)

O trabalhador é conectado à linha de vida através do talabarte, responsável por unir o cinto de segurança à linha de vida. Os principais componentes do equipamento podem ser vistos na figura 3.



Figura 3: Cinturão (esquerda) e talabarte (direita) para trabalho em altura (Fonte: PVA Equipamentos de Segurança)

Existem diversos modelos e fabricantes destes equipamentos no mercado, com diferentes características e preços. Todos eles devem estar construídos e testados de acordo com as NBR 15836 e NBR 15834.

O cabo de aço utilizado no sistema também é fundamental para que se obtenha uma solução segura quanto a linha de vida. Segundo Souza e Branchtein (2010, apud Debarba 2002), um dos parâmetros mais importantes de um cabo de aço é a sua carga de trabalho, a qual representa a força de tração máxima que o cabo pode ser submetido com segurança. Esta carga não deve exceder, via de regra, a um quinto de sua carga mínima de ruptura. O fator, ou índice de segurança de um cabo é dado pela razão entre a sua carga de ruptura mínima e sua carga de trabalho. A carga de ruptura de um cabo está relacionada com a resistência dos seus arames multiplicada pela soma da área metálica de todos os arames. De acordo com Seibel (2012), os fatores de segurança para cabos aço variam, tipicamente, de 3 a 12, dependendo do tipo de aplicação. A NR 18 estipula que os cabos de aço devem ter carga de ruptura equivalente a, no mínimo, cinco vezes a carga máxima de trabalho a que estiverem sujeitos, correspondendo a um fator de segurança igual a 5, independente do tipo de aplicação do cabo.

2. ANÁLISE TEÓRICA DE DESEMPENHO

A figura 4 apresenta de forma esquemática as variáveis envolvidas durante a análise dos esforços causados no sistema pela queda de um trabalhador.

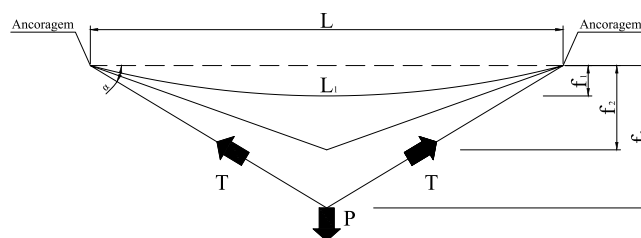


Figura 4: Representação esquemática de uma linha de vida horizontal (Fonte: Dados próprios)

O projeto de uma linha de vida horizontal flexível (LVH) envolve a estimativa de diversos parâmetros para seu correto dimensionamento, os quais necessitam, inicialmente, conhecer os esforços atuantes no sistema. Nesse aspecto, vários pesquisadores propuseram métodos analíticos capazes de calcular a máxima força de impacto do trabalhador no instante da queda. Um método simples foi proposto por Sulowski (1991) apud Coco e Fernandes (2016), o qual está apresentado na Equação 1.

$$P = mg \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2kf}{mg}} \right) \frac{abs}{c} \quad (1)$$

onde: P é a força de impacto do trabalhador, m é a massa do trabalhador, g é a aceleração da gravidade, k é o módulo de corda, f é o fator de queda, a é o fator de redução do trava quedas, b é o fator de

redução do dispositivo de absorção, s é o fator de redução do absorvedor de energia e c é o fator de conversão pesorígido/manequim.

O valor do módulo de corda k é inerente às propriedades do material em que o talabarte é fabricado. Segundo Sulowski (1991), o módulo de corda é apresentado em forma de um gráfico em função do fator de queda, de acordo com a espessura da corda.

De acordo com Coco e Fernandes (2016), o fator de queda consiste na razão entre a altura de queda e o comprimento do talabarte, o qual pode variar de 0 a 2.

Como proposto por com Sulowski (1991), o fator de redução do trava quedas a é expresso pela relação entre a máxima força de impacto num sistema com trava quedas e a máxima força de impacto num sistema sem trava quedas. Seu valor pode variar de 0,5 à 1 de acordo com o sistema em estudo. Um mecanismo equivalente é utilizado para definir o fator de redução do absorvedor de energia s , podendo seus valores variarem de 0,2 à 1,0 dependendo do tipo de absorvedor e do fator de queda f .

Também de acordo Sulowski (1991), o fator de redução b depende do tipo de cinturão, variando de acordo com a elasticidade do material utilizado em sua confecção. Seu valor pode variar de 0,8 à 1,0, sendo neste último caso à ausência de absorção de energia por parte do cinturão.

Segundo Seibel (2012), o fator de conversão c é obtido pela relação peso rígido/manequim articulado, utilizados nos testes de queda. Trata-se de um fator de difícil obtenção, pois os testes envolvendo humanos são de alto risco. Para a utilização em testes como o proposto adota-se o valor de 1,0.

Após conhecer a força de impacto no trabalhador, torna-se possível calcular os demais parâmetros necessários para o dimensionamento da LVH, os quais são apresentados nas Equações 2 a 15. O primeiro deles, a flecha inicial do cabo, consiste na seguinte equação:

$$f_1 = 0,03L \quad (2)$$

onde: f_1 é a flecha inicial do cabo de aço, L é o comprimento do vão em cm. Para obter-se o comprimento total do cabo. Com a equação 3 obtém-se o comprimento total do cabo.

$$L_1 = L + \left[\frac{2}{3} \left(\frac{2f_1}{L} \right)^2 \right] \quad (3)$$

onde: L_1 é o comprimento do cabo. Através da equação 4 obtém-se a flecha final, ou seja, após o sistema regressar ao repouso.

$$f_2 = \sqrt{\left(\frac{L_1}{2} \right)^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2} \quad (4)$$

onde: f_2 é a flecha do cabo em repouso. Para se chegar ao valor da seção transversal do cabo utiliza-se a equação 5.

$$A_c = FD^2 \quad (5)$$

onde: A_c é a área da seção do cabo, F é o fator de ajuste e D é o diâmetro do cabo adotado em cm. Com a equação 6 se obtém o alongamento do cabo por uma força estimada.

$$\Delta L = \frac{TL_1}{EA_c} \quad (6)$$

onde: ΔL é o alongamento do cabo por uma força estimada, T é a força de tração no cabo estimada inicialmente e E é o módulo de elasticidade do cabo de aço. A partir destas variáveis é possível, através de um processo iterativo, obter-se a flecha máxima ou flecha dinâmica. Utilizando-se a equação 7 obtém-se a flecha dinâmica ou flecha máxima.

$$f_3 = \sqrt{\left(\frac{L_1 + \Delta L}{2} \right)^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2} \quad (7)$$

onde: f_3 é a flecha dinâmica do cabo, ou seja, instante de flecha com a maior amplitude durante a queda. A partir da flecha máxima é possível averiguar os esforços atuantes nas componentes vertical e

horizontal. Com a equação 8 se chega ao valor da tração máxima no cabo.

$$T_1 = \frac{P(L_1 + \Delta L)}{4f_3} \quad (8)$$

onde: T_1 é a força de tração no cabo de aço. Com as equações 9 e 10 as forças são decompostas nas componentes horizontal e vertical, respectivamente.

$$T_x = T_1 \cos \alpha \quad (9)$$

$$T_y = T_1 \sin \alpha \quad (10)$$

onde: T_x é a força de horizontal na ancoragem e T_y é a força de vertical na ancoragem.

O equacionamento proposto por Sulowski (1991) não produziu resultados adequados quando realizados testes utilizando uma massa de ensaio de 1,3 kg por tratar-se de um modelo concebido para massas da ordem dos 100 kg. Para obter-se a força causada pelo impacto no ensaio em escala laboratorial, a força P encontrada através do equacionamento para um caso real foi multiplicada por um fator de escala. Esse fator de escala é uma relação entre a massa do ensaio em escala e a massa do ensaio real, conforme discutido por Ramu *et al.* (2013) quando se trata de situações em que se trabalha com experimentos em escala, tratando-se de um mecanismo comprovadamente eficaz proveniente de estudos científicos consolidados para este fim. As equações 11 e 12 apresentam a forma com que o fator de escala é obtido e aplicado para a estimativa da força de impacto do ensaio em escala.

$$e = \frac{m_e}{m_r} \quad (11)$$

$$P_e = Pe \quad (12)$$

onde: e é o fator de escala, m_e é a massa do ensaio em escala, m_r é a massa do ensaio real e P_e é a força de impacto no ensaio em escala.

A partir dos esforços calculados é possível calcular as tensões que atuam nos pilares do sistema de ancoragem. Sendo ela de flexão, causada pela componente horizontal T_x e de compressão causada, por conta da componente vertical da T_y . Com a equação 13 se obtém a tensão em flexão no pilar.

$$\sigma_M = \frac{My}{I} \quad (13)$$

onde: σ_M é a tensão de flexão, M é o momento fletor, y é a distância entre o plano neutro em relação à fibra externa do elemento e I é o momento de inércia para a seção transversal desejada. Com a equação 14 se obtém a tensão em compressão no pilar.

$$\sigma_N = \frac{P}{A} \quad (14)$$

onde: σ_N é a tensão de compressão e A é a área da seção transversal.

A tensão máxima no pilar é obtida através da superposição das tensões, ou seja, somando-se os efeitos das tensões em cada região do pilar, obtida através da equação 15.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_M + \sigma_N \quad (15)$$

onde: $\sigma_{m\acute{a}x}$ é a máxima tensão atuante no pilar.

3. PROGRAMA DE COMPUTADOR

Foi elaborado um algoritmo com a finalidade de automatizar o processo de cálculo do modelo baseado no proposto por Sulowski (1991). O software é capaz de obter, através das equações e de um processo iterativo, as informações relativas à deflexão e tração no cabo, bem como a tensão máxima atuante no ponto mais crítico do pilar.

O algoritmo foi desenvolvido utilizando-se o software MatLab como plataforma, devido à possibilidade de se gerar gráficos dos resultados com facilidade além da sintaxe simples e objetiva. A figura 5 apresenta um diagrama lógico da operacionalidade do algoritmo.

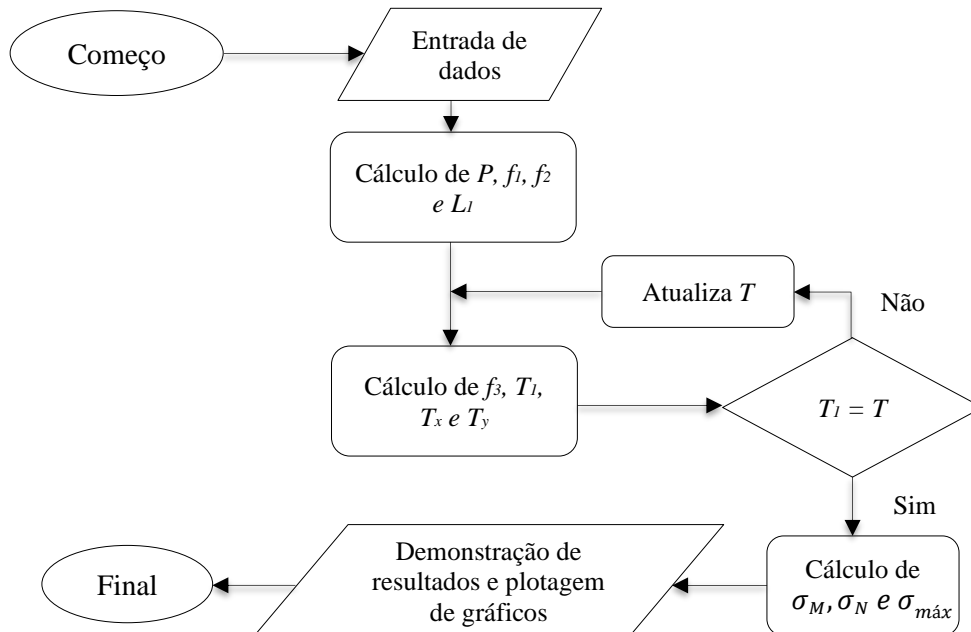


Figura 5: Fluxograma do software desenvolvido para o modelo de Sulowski (Fonte: Dados próprios)

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Serão avaliados neste trabalho 4 diferentes tipos de ancoragem, com diferentes configurações de rigidez do sistema de ancoragens. É importante salientar que apenas uma das configurações foi testada em laboratório, com a finalidade de validar o modelo proposto. As outras configurações foram simuladas numericamente a partir do modelo citado. As diferentes configurações foram denominadas de A-1, A-2, A-3 e A-4, seguindo uma ordem crescente de rigidez.

A ancoragem do tipo A-1 possui estrutura flexível com fixação do pilar simplesmente apoiada, sendo a configuração testada experimentalmente e que possui a menor rigidez. A ancoragem do tipo A-2 é composta por uma estrutura rígida com fixação do pilar apenas por apoios, enquanto a ancoragem do tipo A-3 tem estrutura rígida com fixação do pilar do tipo engastado. A ancoragem do tipo A-4 é fixada com chumbadores rígidos, ou seja, não há pilares no sistema de fixação e ancoragem da linha de vida. Nesse caso a linha de vida é ancorada diretamente na estrutura da edificação, sendo essa a situação mais crítica para os componentes que compõem a linha de vida e para o trabalhador, pois espera-se que a tração no cabo seja superior, como discutido nas seguintes seções deste trabalho. A ancoragem do tipo A-4, a de maior rigidez, vai de encontro com o solicitado na NBR-16325/2015 para teste de componentes de linhas de vida por tratar-se da situação em que há a maior solicitação destes componentes.

Para a realização dos testes experimentais, foi desenvolvida uma configuração experimental em escala laboratorial, conforme representação esquemática da figura 6.

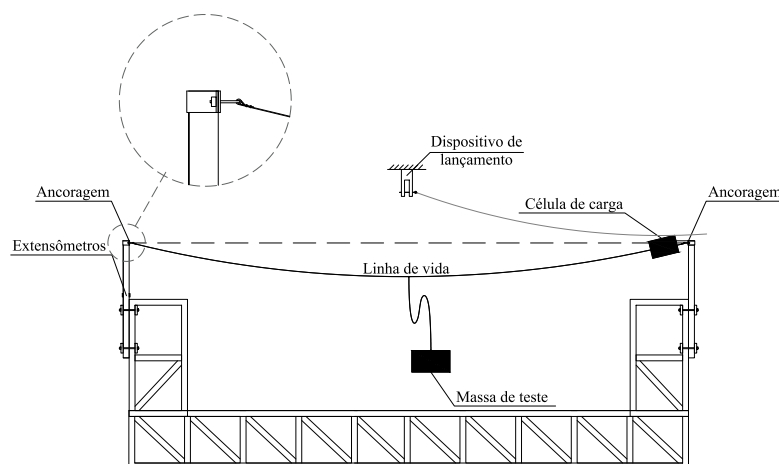


Figura 6: Representação esquemática da instrumentação do teste (Fonte: Dados próprios)

O aparato instrumental utilizado no teste é composto por dois extensômetros lineares uniaxiais (modelo unidirecional PA-06-125BA-120-LL, EXCEL) posicionados em paredes opostas e uma célula de carga HBM-S40, operando juntamente com um sistema de aquisição de dados Ômega IN-USBH, como taxa de leitura de até 1000 Hz. Além disso, foram utilizadas duas câmeras com resolução de 1280 x 720 pixels e taxa de aquisição de 60 quadros por segundo, a fim de se utilizar análise por vídeo para definir a deflexão vertical no cabo e a deflexão lateral no topo do pilar durante o teste através do software Tracker. O *layout* utilizado para a captura das imagens durante o teste por ser visto na figura 7.

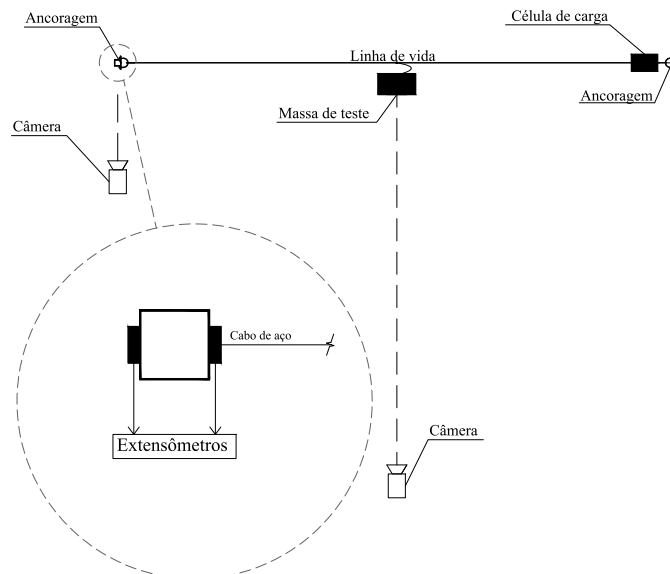


Figura 7: Representação esquemática da vista superior da instrumentação do teste (Fonte: Dados próprios)

Abaixo na figura 8 pode ser observado o sistema construído para a execução do teste, bem como a forma de fixação dos pilares e da célula de carga. As alturas de queda tem por referência o comprimento do talabarte totalmente estendido, ou seja, a partir da posição final da massa rígida. Foram testadas as alturas de queda de 0,2 m, 0,4 m, 0,75 m e 1,15 m. As duas primeiras alturas de queda citadas possuem um fator de queda inferior a 1, enquanto as últimas duas possuem fator de queda superior a 1. Os fatores de queda com valor abaixo de 1 representam alturas de queda inferior ao nível da linha de vida, enquanto os fatores de queda com valores acima de 1 representam alturas de queda superiores ao nível da linha de vida.

Os pilares tem altura total de 0,75 m. Os extensômetros foram posicionados logo acima dos apoios de fixação do pilar, a uma distância de 15 mm do apoio.



Figura 8: Sistema construído para a execução do teste (Fonte: Dados próprios)

4.1. PROTOCOLO DE REALIZAÇÃO DOS TESTES

A operacionalização dos ensaios com a LVH em escala laboratorial, conforme configuração experimental apresentada na Figura 8, pode ser descrita com base nas seguintes etapas:

1. Queda livre da massa: inicia com a liberação da massa à uma altura determinada. O término

- da queda livre ocorre com a retenção da queda;
2. Retenção da queda: durante esta fase, a energia cinética da massa em queda livre é absorvida pela linha de vida e pelo sistema de ancoragem, provocando o alongamento do cabo, ou seja, o aumento da deflexão central de f_1 para f_3 ;
 3. Aquisição de dados;

O sistema é composto por dois pilares de aço de 30 x 30 x 2 mm e módulo de elasticidade de 210 GPa, afastados 2,43 m (vão livre) onde é ancorado um cabo de aço com alma de fibra, diâmetro nominal de 4,80 mm, carga mínima de ruptura de 1.370 kg e módulo de elasticidade de 8.500 kgf/mm² a 9.500 kgf/mm², conforme dados do fabricante. A corda utilizada como talabarte é uma corda dinâmica de 11 mm de diâmetro conforme EN 892, específica para essa aplicação, com comprimento total de 0,65 m. A massa rígida utilizada no teste possui uma massa total de 1,3 kg.

Foram levantadas experimentalmente as curvas de comportamento do material durante a retenção da queda. Dessa forma, foram avaliadas a deformação e, conseqüentemente, a tensão presente na base do pilar de ancoragem, próximo a zona de fixação com a estrutura. Utilizando a célula de carga, foi possível captar o comportamento oscilatório da força de tração no cabo de aço, ao longo do ensaio dinâmico.

Para se avaliar deflexão vertical na posição central do cabo durante a retenção da queda, foi utilizada a técnica de videoanálise. Os ensaios foram registrados em forma de vídeo e, posteriormente, analisados através do software Tracker. O software é capaz de rastrear um ponto determinado no vídeo e, através de uma referência de comprimento, é capaz de registrar o deslocamento deste ponto em relação à um sistema de coordenadas escolhido. Vale citar que a qualidade do resultado está diretamente ligada à qualidade do vídeo gravado, devendo o local ter boas condições de iluminação e de gravação.

Um ponto importante a ser considerado é a rigidez do sistema como um todo, podendo variar de acordo com a forma de fixação do pilar (apoiado ou engastado) ou até mesmo a ausência de pilar (ancoragem rígida). No caso dos pilares serem fixados em uma estrutura flexível, há ainda a influência da rigidez de toda a estrutura. Todos esses fatores combinados podem gerar diferentes rigidezes para a estrutura, o que irá modificar significativamente o comportamento do sistema durante o teste dinâmico.

Para obter a rigidez equivalente da estrutura de sustentação do pilar utilizada no teste dinâmico foi elaborado um teste em laboratório utilizando deflectômetros e um mecanismo de aplicação incremental de carregamento na estrutura. O sistema desenvolvido pode ser observado na figura 9.



Figura 9: Aparato construído para verificação da rigidez da estrutura (Fonte: Dados próprios)

Foram posicionados dois deflectômetros, um instalado na base e outro no topo do pilar, conforme mostrado na figura 10, para que fosse possível avaliar o deslocamento do sistema em ambos os pontos. O pilar foi conectado através de um cabo de aço à um recipiente onde adicionou-se incrementalmente massa em frações iguais, demonstrado na figura 11. Dessa forma foi possível aferir a rigidez da estrutura como um todo, alimentando o modelo matemático em estudo com informações fidedignas à realidade.

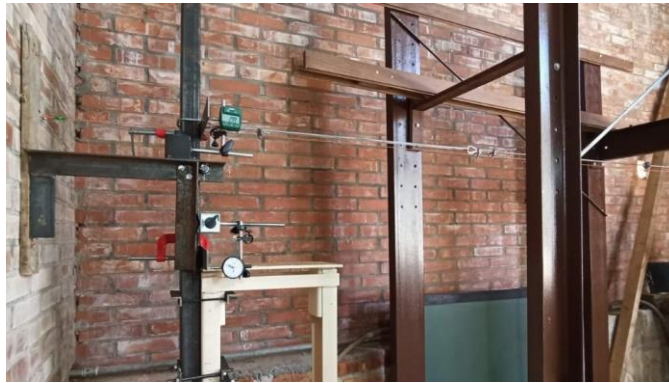


Figura 10: Posicionamento dos deflectômetros (Fonte: Dados próprios)



Figura 11: Recipiente para alocação das frações de massa (Fonte: Dados próprios)

Através desta metodologia foi possível aferir a rigidez da estrutura, apresentada no gráfico da figura 12. Cabe observar que o carregamento aplicado foi inferior ao necessário para que ocorresse a deformação plástica, visto a linearidade do gráfico apresentado.

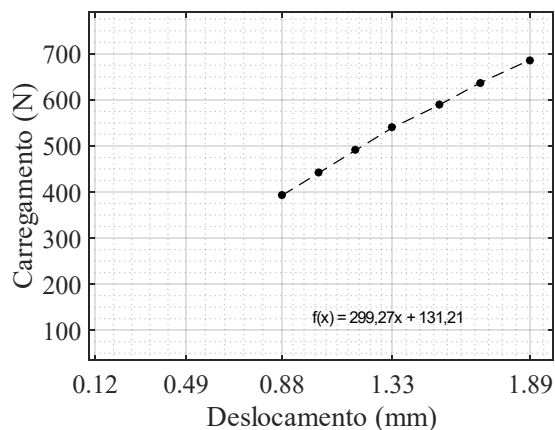


Figura 12: Rigidez da estrutura (Fonte: Dados próprios)

5. RESULTADOS TEÓRICO-EXPERIMENTAIS

Os testes foram realizados utilizando-se quatro diferentes alturas de queda, ou seja, quatro diferentes fatores de queda. Na sequência podem ser observados os resultados obtidos analiticamente e teoricamente.

Na figura 13 são apresentados os gráficos concatenando os resultados dos testes experimentais e da simulação numérica proposta para diferentes alturas de queda. No gráfico da figura 13a, são apresentados os valores médios e desvio padrão relativos à tração no cabo. A figura 13b apresenta o gráfico da tensão atuante na parede externa do pilar, na posição onde foram instalados os extensômetros. O gráfico da figura 13c apresenta os valores médios e desvio padrão para a deflexão horizontal no topo do pilar durante a retenção da queda. Observa-se que a medida em que a altura de

queda se torna maior, a tração no cabo e, conseqüentemente, a tensão e a deflexão no pilar se tornam maiores devido à força do impacto causado pela retenção da queda da massa de teste. Os valores do deslocamento no topo do pilar foram obtidos por meio de sistema de medição do deslocamento por videoanálise.

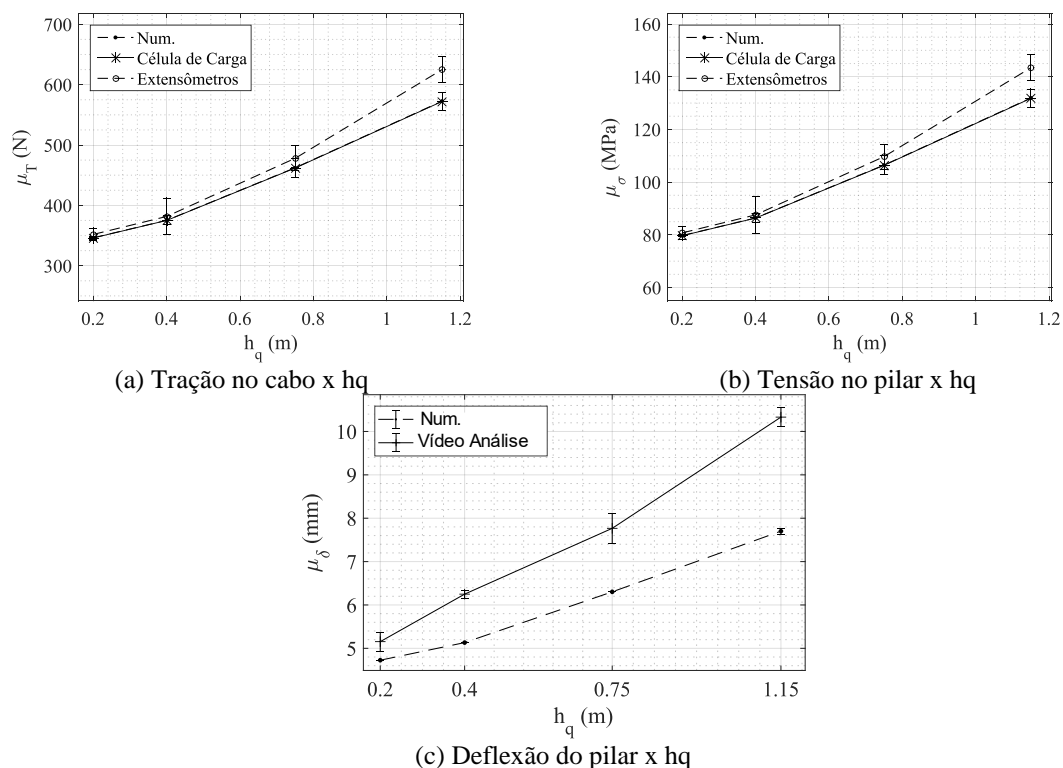
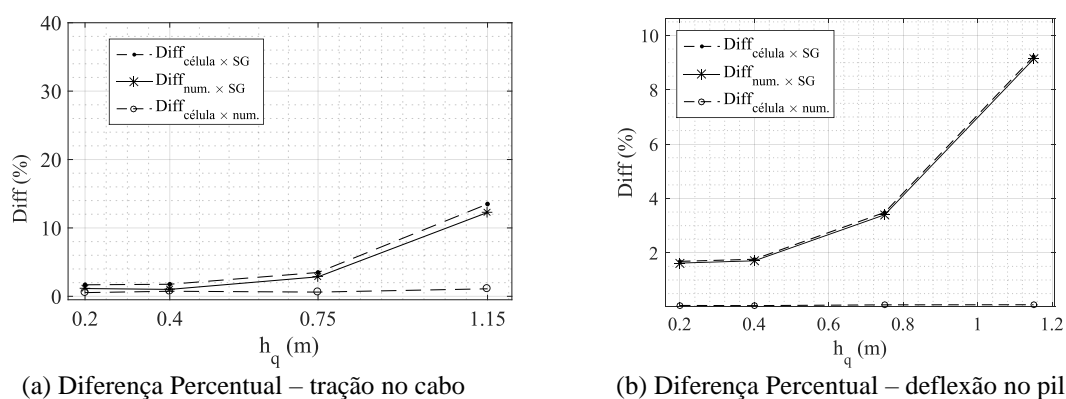


Figura 13 – Comportamento da linha de vida para diferentes alturas de queda (Fonte: Dados próprios). Nota: h_q = altura de queda da massa rígida; μ_T = tração média no cabo; μ_σ = tensão média no pilar;

$Diff$ = Diferença percentual; μ_δ = deflexão lateral média no topo do pilar.

A fim de demonstrar a forma com que os valores de tração no cabo obtida por meio de diferentes métricas atingem resultados similares, são apresentadas nas figuras 14a as diferenças percentuais entre: tração no cabo, captada pela célula de carga, em relação a força horizontal no topo do pilar devido à deformação registrada pelos *strain gauges*; tração no cabo, captada pela célula de carga, em relação a força horizontal no topo do pilar calculada pelo método numérico baseado no modelo do Sulowski; força horizontal no topo do pilar calculada pelo método numérico em relação à mesma componente de força obtida pela deformação dos *strain gauges*.

De forma análoga, são apresentadas nas figuras 14b as diferenças percentuais entre: deflexão no topo do pilar, calculada através da força horizontal no topo do pilar registrada pelo célula de carga em relação aos *strain gauges* (1,68% a 9,23%); deflexão no topo do pilar, calculada através do método numérico baseado no modelo do Sulowski em relação aos *strain gauges* (0,6% a 0,08%); deflexão no topo do pilar, calculada através da força horizontal no topo do pilar registrada pelo célula de carga em relação ao método numérico baseado no modelo do Sulowski (1,62% a 9,13%).



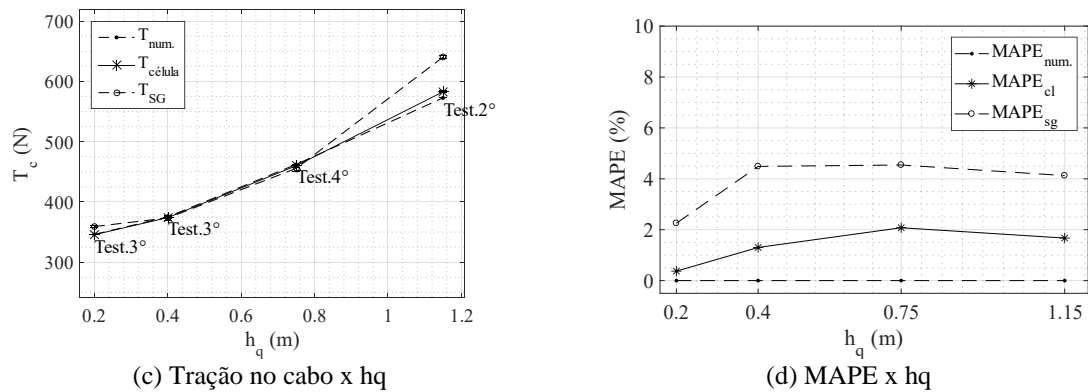


Figura 14 – Tração no cabo e MAPE para diferentes alturas de queda testadas (Fonte: Dados próprios). Nota: T_{num} = Tração no cabo obtida pelo modelo numérico; T_{cell} = Tração no cabo registrada pela célula de carga; T_{SG} = Tração no cabo calculada com base na deformação do pilar, registrada pelo Strain Gauge; $MAPE_{num}$ = média absoluta percentual do erro para a tração no cabo obtida pelo modelo numérico; $MAPE_{cell}$ = média absoluta percentual do erro para a tração no cabo registrada pela célula de carga; $MAPE_{SG}$ = média absoluta percentual do erro para a tração no cabo calculada com base na deformação do pilar, registrada pelo Strain Gauge.

Além dos valores médios para a tração no cabo, o gráfico mostrado na figura 14c apresenta os valores reais mais próximos ao valor médio, para cada altura de queda, e seu respectivo teste associado. Já no gráfico da figura 14d, são apresentados os valores da média absoluta percentual do erro (MAPE) para cada altura de queda.

A diferença entre os valores obtidos numericamente e experimentalmente tendem a se afastar de acordo com o aumento da altura de queda, partido de um patamar inferior aos 2% e chegando a aproximadamente 9% na altura de 1,15m. Esse comportamento pode ser justificado pela existência de não-linearidades geométricas. Seus efeitos se tornam mais acentuados à medida que os esforços se tornam mais elevados.

Os resultados obtidos vão de encontro à análise feita por Galy e Lan (2017), possuindo variações percentuais de mesma ordem de valores das encontradas nos ensaios em laboratório. Os autores afirmam que a existência dessa variação é esperada por existirem variações intrínsecas à um ensaio dinâmico, bem como a existência de não linearidades geométricas da estrutura portante. Sulowski e Miura (1983, apud Galy e Lan 2017) também encontraram desvios entre as medidas experimentais e os resultados de seu modelo na casa dos 10%, mesmo seu estudo não considerando a rigidez da ancoragem, reforçando ainda mais a existência de variações diretamente relacionadas ao ensaio dinâmico. Baszczyński (2017), de forma semelhante, concluiu que as variações entre os resultados testados e calculados é inferior a 20%, atribuindo essa diferença a parâmetros como a flexibilidade do talabarte e a deflexão inicial da linha devido à gravidade, além das incertezas de medição e imperfeições do modelo por ele utilizado.

O estudo do comportamento dinâmico da sistema de proteção contra quedas instrumentado foi realizado para os testes que mais se aproximaram do valor médio entre os cinco lançamentos realizados para a altura de queda igual a 0,75 m. Os resultados para a altura de queda de 0,75 m são apresentados na figura 15.

A partir dos gráficos apresentados nas figuras 15a e 15b, é possível confirmar a correta leitura dos sistemas utilizados instrumentação do teste, bem como a convergência desses resultados experimentais com o modelo numérico. Desta forma é possível assegurar a confiabilidade dos dados obtidos durante o ensaio. Na figura 15c o gráfico apresentado demonstra que os pontos onde ocorre a flecha máxima também são os pontos onde ocorre a máxima deflexão no topo pilar, conforme esperado. Pode-se observar que há um movimento oscilatório e que é absorvido pela flexibilidade da estrutura portante até o sistema chegar ao repouso.

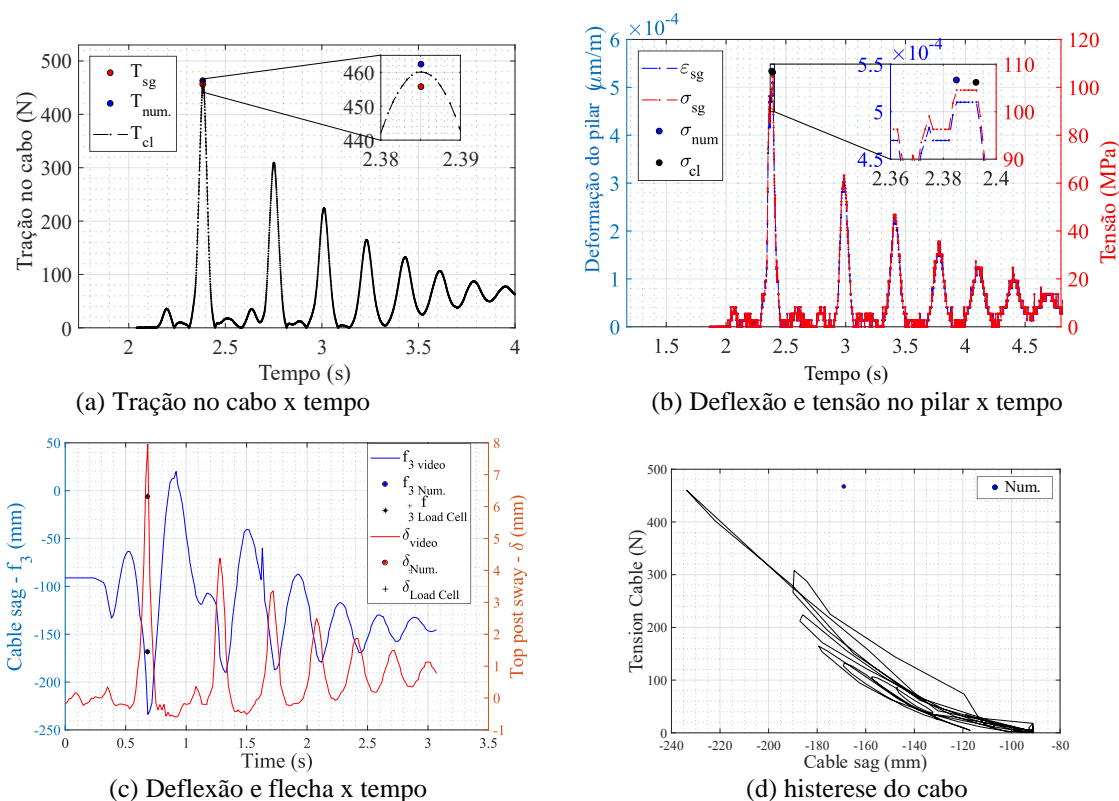


Figura 15 – Comportamento da linha de vida para diferentes alturas de queda (Fonte: Dados próprios). Nota: *LC* = dados obtidos pela célula de carga; *SG* = Dados associados à deformação captada pelos Strain Gauges; *Num* = Resultado numérico com base no modelo de Sulowski.

O comportamento do pilar pode ser observado nos gráficos da figura 16. A figura 16a apresenta o comportamento da tensão e deformação durante o ensaio dinâmico. A relação linear entre a tensão e deformação prova que o pilar se manteve em regime elástico durante todo o teste dinâmico. Em complemento, a figura 16b ilustra a histerese no topo do pilar.

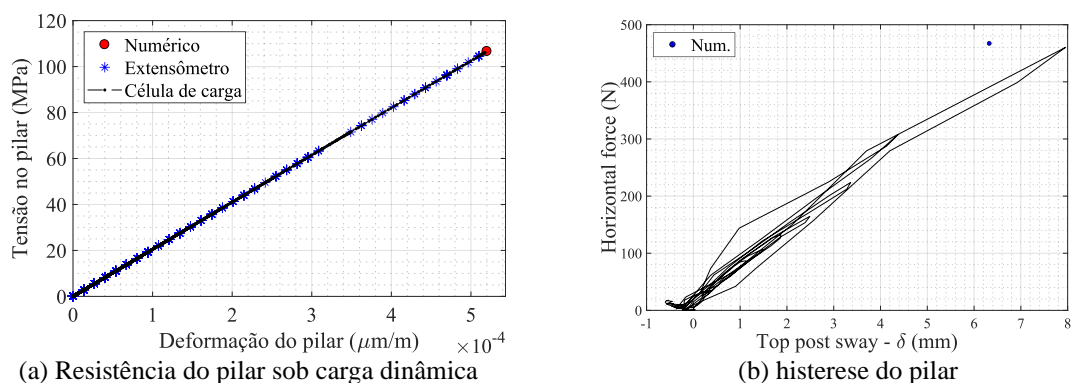


Figura 16 – Resistência do pilar durante o carregamento dinâmico (Fonte: Dados próprios)

As diferenças apresentadas entre os dados levantados experimentalmente e numericamente se devem, principalmente, por folgas impossíveis de serem mensuradas na estrutura portante, tais como junções aparafusadas. Além disso, conforme já observado por outros autores em estudos similares, existem fatores difíceis de serem mensurados e que são fontes de incerteza, tais como a flexibilidade do talabarte, deflexão inicial da linha devido à gravidade, incertezas de medição e imperfeições que o modelo é incapaz de computar.

Uma parcela dessa discrepância numérico/experimental está associada à não linearidade geométrica da estrutura portante, observada no gráfico da figura 17 que representa o ensaio realizado para levantar

a rigidez da estrutura. Pode-se observar que a curva possui uma pequena não linearidade, causadas por essa não linearidade geométrica, ou seja, folgas mecânicas que existem em junções aparafusadas por exemplo.

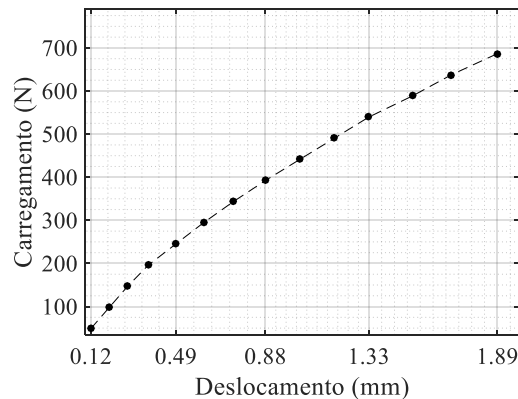


Figura 17 – Comportamento no ensaio quase-estático (Fonte: Dados próprios)

5.1. COMPARAÇÃO NUMÉRICA DE RIGIDEZ

Na figura 18 são apresentados os valores de tensão simulados numericamente, de acordo com o modelo, para 4 diferentes situações de rigidez das ancoragens e estruturas portantes, sendo:

- A-1: Estrutura de ancoragem flexível com fixação do pilar por apoios;
- A-2: Estrutura de ancoragem rígida com fixação do pilar por apoios;
- A-3: Estrutura de ancoragem rígida com fixação do pilar do tipo engastado;
- A-4: Ancoragem com chumbadores rígidos (sem pilares);

Pode-se observar que na ancoragem tipo A-4 a força registrada é muito superior, pois simula uma ancoragem perfeitamente rígida, tal que, por esse sistema não sofrer deformação, toda a energia gerada na queda do operador deve ser absorvida pela deformação do cabo e talabarte, resultando em maiores esforços de tração no cabo e carga de parada no trabalhador. No entanto a ancoragem tipo A-1 corresponde ao sistema de ancoragem com menor rigidez, o qual foi analisado experimentalmente neste trabalho. Para esta configuração, parte da energia é absorvida pelo próprio sistema de ancoragens e sua estrutura portante. Na figura 18a e 18b pode se observar como o comportamento da tensão no cabo e flecha f_3 variam com as diferentes rigidezes.

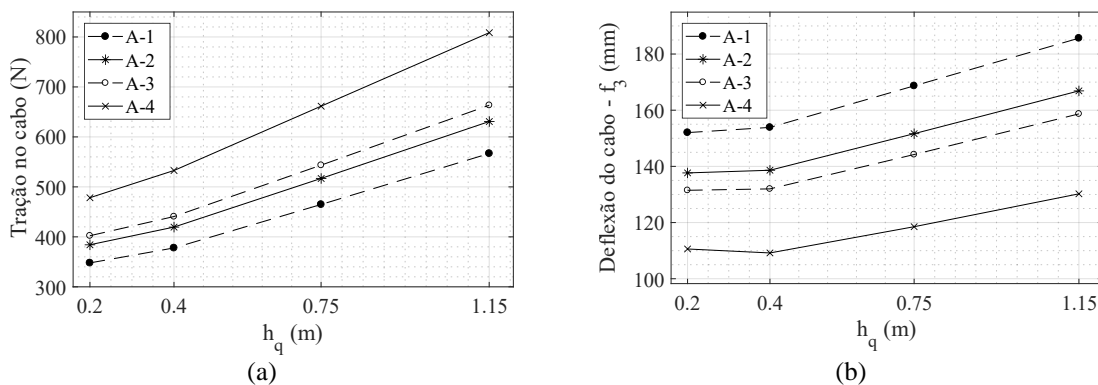


Figura 18 – Tensão no cabo e flecha máxima para ancoragens de diferentes rigidezes (Fonte: Dados próprios)

O gráfico apresentado na Figura 18 demonstra um aumento na deflexão vertical do cabo à medida que as alturas de queda tornam-se maiores e a rigidez do sistema de ancoragem menor. Esse comportamento também foi observado em Galy B. et al. 2017 e Galy B. et al. 2018 em análises semelhantes, porém em escala real. Desta forma, é possível afirmar que o desempenho apresentado pela linha de vida, em escala laboratorial, investigada neste trabalho fornece informações adequadas para previsão do comportamento real destes sistemas durante a queda real de um trabalhador. No gráfico apresentado na figura 19 pode-se perceber que a diferença percentual para a tensão e para a tração no cabo que chega a atingir aproximadamente 30% quando comparados os sistemas de ancoragem A-1 e

A-4 na altura de queda de 1,15 m. A altura de queda de 1,15 m representa a situação em que há a maior sollicitação dos componentes da linha de vida devido a maior altura de queda. Uma variação na casa dos 30% é de grande expressividade na avaliação final do comportamento do sistema durante a retenção da queda.

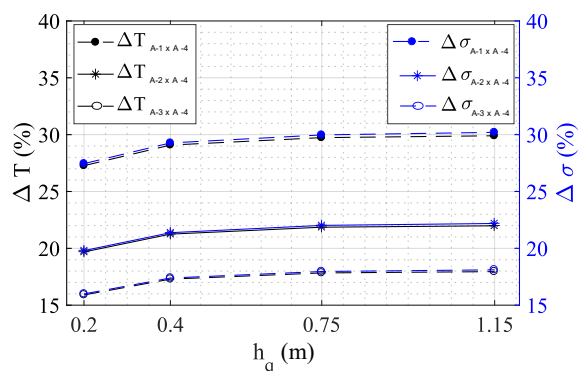


Figura 19 – Diferença percentual entre as ancoragens de diferentes rigidezes (Fonte: Dados próprios)

O comportamento da linha de vida pode sofrer alterações significativas de acordo com a rigidez da estrutura portante do sistema de ancoragem. A importância dessa observação se dá pelo fato de que, no caso de um sinistro real, o absorvedor de energia poderia não atuar de forma adequada no momento da queda de um trabalhador. O absorvedor de energia é um EPI utilizado em conjunto com as linhas de vida quando o talabarte possuir mais de 0,90 m de comprimento, conforme preconiza a NR-35. De acordo com a NBR 14629:2011, o absorvedor de energia deve suportar um carregamento de 2 kN por 3 minutos sem que ocorra a abertura do absorvedor de energia, e que a força máxima transmitida ao trabalhador através do cinto de segurança seja de 6 kN.

Lorenzi (2019) averiguou através de testes de talabartes com absorvedores de energia de diferentes fabricantes a força em que ocorre o rompimento das costuras do absorvedor de energia e, conseqüentemente, o momento em que ele passa a atuar. O valor mínimo para a abertura do absorvedor de energia registrado nesta testagem foi de 3,597 kN, enquanto o máximo foi de 5,739 kN. No estudo realizado por Galy e Lan (2017), foi averiguado que a força média em que os absorvedores de energia eram ativados ficou na casa dos 3,6 kN, ou seja, houveram valores superiores mas também inferiores a este patamar. No trabalho os autores apresentam também o fato de que a rigidez da estrutura não possuía um valor elevado, culminando no mesmo comportamento aferidos nos testes realizados em laboratório. Com o aumento da flexibilidade do sistema há uma redução da tração que atua no cabo de aço, podendo interferir na carga mínima de abertura de um absorvedor de energia e no comportamento da linha de vida como um todo durante a retenção de uma queda.

6. CONCLUSÕES

O estudo das linhas de vida é de extrema importância ao passo que pode assegurar que trabalhadores não sofram maiores conseqüências em caso de queda durante um trabalho em altura. As linhas de vida flexíveis horizontais demonstram possuir diversas peculiaridades quando de um sinistro, por serem submetidas a carregamentos de grande magnitude em um curtíssimo intervalo de tempo.

Tal complexidade pode ser percebida no próprio modelo matemático, que é constituído por diferentes fatores de ajuste de acordo com as variáveis envolvidas, tais como a rigidez do sistema e a flexibilidade da corda do talabarte. O ajuste fidedigno desses fatores só é possível através de testes práticos como os realizados, onde os valores das variáveis aferidas, se comparados aos obtidos numericamente, possuem uma diferença inferior a 10%. A partir desses ajustes, pode-se considerar o modelo apto para caracterizar o comportamento de linhas de vida com características semelhantes, auxiliando no projeto desse tipo de proteção, utilizado em larga escala.

O trabalho foi desenvolvido com base em dados coletados durante a execução de testes em escala, porém o comportamento do sistema será muito semelhante em escala real. As variações percentuais dos valores de força, tensão e deflexão máximas decorrentes da variação da rigidez do sistema, que ultrapassam os 30% nos casos mais severos, mostram um importante foco a ser analisado e que demanda atenção do engenheiro ao se propor a projetar uma linha de vida flexível horizontal. A força do impacto pode não ser o suficiente para abrir o absorvedor de energia, o que pode não ser interessante visto que o EPI não vai operar da forma esperada em conjunto com a linha de vida.

Os objetivos deste trabalho foram alcançados ao passo que, através dos resultados dos testes

realizados, é possível descrever a forma com que uma linha de vida flexível horizontal e seu sistema de ancoragem se comporta no caso de um acidente. A segurança do trabalho mostra-se um ramo promissor e muito abrangente, visto que tem ganhado cada vez mais notoriedade e atenção quanto aos aspectos legais, sendo o trabalho em altura um dos grandes responsáveis por expor trabalhadores às condições de risco diariamente nas indústrias, serviços e canteiros de obra.

7. AGRADECIMENTOS

A realização deste estudo só foi possível graças a Pró-Ação Engenharia e a Previne Engenharia de Segurança. Fica aqui registrado o agradecimento às duas empresas por cederem a célula de carga e o sistema de aquisição de dados, bem como parte do material utilizado para a construção da linha de vida no laboratório.

8. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14629: Equipamento de proteção individual contra queda de altura — Absorvedor de energia. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16325-1: Proteção contra queda de altura — Dispositivos de ancoragem tipos A, B e D. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16325-2: Proteção contra queda de altura — Dispositivos de ancoragem tipo C. Rio de Janeiro, 2014.
- BRASIL. Ministério do Trabalho. SAMPAIO, Simone; “Quedas com diferença de nível são a segunda principal causa de acidentes fatais no trabalho”. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/noticias/5782-queda-com-diferenca-de-nivel-sao-a-segunda-principal-cao-de-acidentes-fatais-no-trabalho>>. Acesso em: 02 de outubro de 2019.
- 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.
- BRANCHTEIN, M. C. Lifeline design: Calculation of the tensions. In: Proceedings of the International Society for Fall Protection Symposium. 2013. p. 27-28.
- GALY, Bertrand; LAN, André: Design of Horizontal Lifeline Systems for Fall Protection Update of Technical Guide. Montreal, 2017.
- COCO, Felipe Gerônimo; FERNANDES, Gustavo Muniz: Influência do Fator de Queda e do Tamanho do Vão no Dimensionamento de linha de Vida Horizontal Flexível (LVHF) Para Trabalho em Altura. Vitória, 2016.
- GALY, Bertrand; LAN, André: Horizontal lifelines - review of regulations and simple design method considering anchorage rigidity. Montreal, 2017.
- BRANCHTEIN, Miguel Coifman. Lifeline Design: Calculation of the Tensions. Proceedings of the 2013 International Society for Fall Protection Symposium. Las Vegas, 2013.
- DEBARBA, Lúcio. Sistemas de Proteção Contra Queda de Altura na Construção Civil. 2002. 42 f. Monografia (Curso de Pós Graduação em Engenharia de Segurança do trabalho) - Universidade Franciscana, Santa Maria, 2012.
- SEIBEL, Mauricio T. Elaboração de Roteiro para Implantação de Sistema de Proteção Contra Quedas. Unijuí. Ijuí, 2012.
- Arteau, J. et A. Lan. 1991. Guide Technique - Conception Des Câbles De Secours Horizontaux. Coll. “Études et Recherches / Guide Technique,” Rapport T-18. IRSST.
- Dayawansa, P.H., C.C. Goh et R. Wilkie. 1989. Analysis and Testing of a Static Line System. Rapport MRL/CN8/89/001, The Broken Hill Proprietary Company Limited.
- Sulowski, A.C. et N. Miura. 1983. Horizontal Lifelines. Rapport No 83-294-H, Ontario hydro research division.
- BASZCZYNSKI, K. Modeling the performance of horizontal anchor lines during fall arrest. FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, v. 25, n. 125, 2017.
- BASZCZYNSKI, K.; ZROBEK, Z. Dynamic performance of horizontal flexible anchor lines during fall arrest – a numerical method of simulation. INTERNATIONAL JOURNAL OF OCCUPATIONAL SAFETY AND ERGONOMICS, v. 6, n. 4, p. 521 – 534, 2000.
- RAMU, Murugan; RAJA, V. Prabhu; THYLA, P. R. Establishment of structural similitude for elastic models and validation of scaling laws. KSCE Journal of Civil Engineering, v. 17, n. 1, p. 139-144, 2013.
- FREITAS, Lorenzi Moreira de. Análise numérico experimental da força decorrente da queda de um

operário em um sistema com linha de vida horizontal flexível e talabarte com absorvedor de energia. 2019.

Tracker: Video Analysis and Modeling Tool. Disponível em: <https://physlets.org/tracker/>, acessado em 21/09/2020.

ABSTRACT

Ivan Miguel Buco, ivanm.bucco@gmail.com - Discente

Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br - Orientador

Alexandre José Bühler, alexandre.buhler@farroupilha.ifrs.edu.br - Coorientador

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha

***Abstract.** The purpose of this paper is to analyze the behavior of a horizontal flexible lifelines systems during falls from different heights, that is, different fall factors. This study performed through a theoretical-experimental analysis, from the rigidity of the anchorage system. This type of lifeline is widely used in buildings of all types, both industrially and residentially, to prevent workers who perform work at heights from suffering accidents due to falls. Take into account importance of worker safety, a method was developed to analyze the behavior of lifelines according to the variation of the rigidity of the structure. The model was analytically evaluated, subsequently analyzed and validated through practical tests using a fall test. From the data obtained through the tests and the proposed calculations it is possible to understand the behavior of the system.*

***Keywords:** lifelines, work safety, fall arrest systems, fall test; anchorage flexibility;*