

MONITORAMENTO E CONTROLE DO RISCO DE QUEDA EM ALTURA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DAS METODOLOGIAS DE COLETA DE DADOS BASEADAS EM SENSORES E TECNOLOGIAS INTELIGENTES

MONITORING AND CONTROLLING THE RISK OF FALLS FROM HEIGHT: A SYSTEMATIC REVIEW OF DATA COLLECTION METHODOLOGIES BASED ON SENSORS AND SMART TECHNOLOGIES

MONITOREO Y CONTROL DEL RIESGO DE CAÍDAS EN ALTURA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE METODOLOGÍAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS BASADAS EN SENSORES Y TECNOLOGÍAS INTELIGENTES

Luiz Felipe Caramez Berteges¹
Alex Franco Ferreira²

RESUMO: No ambiente de trabalho, é a Segurança do Trabalho que constitui o campo de conhecimento dedicado ao estudo aprofundado das causas e fatores que originam acidentes e incidentes durante a execução de tarefas laborais. Frente à situação crítica de que as quedas de altura são responsáveis por cerca de quatro em cada dez acidentes de trabalho no Brasil, o objetivo deste projeto é analisar de forma sistemática e aprofundada novos métodos de monitoramento e apoio à segurança do trabalho em altura evidenciando as metodologias de coleta de dados adotadas. Este trabalho adotou como metodologia uma revisão de literatura sistematizada, buscando exclusivamente artigos científicos em periódicos das bases Scopus e Web of Science publicados nos últimos cinco anos, refinando a busca para 23 artigos sobre o uso de dispositivos e sensores no monitoramento de trabalho em altura. Os resultados desta pesquisa evidenciam um avanço significativo no uso de tecnologias para o monitoramento e controle do trabalho em altura, com destaque para o emprego de Unidades de Medição Inercial (IMU), sensores biométricos, sistemas de visão computacional e tecnologias IoT. Conclui-se que o uso de sensores vestíveis e sistemas automatizados, como aqueles baseados em Unidades de Medição Inercial (IMUs) e aprendizado de máquina, representa a principal tendência para aumentar a precisão e a rapidez na detecção de situações de risco, garantindo a segurança e a integridade dos trabalhadores em atividades em altura.

1

Palavras-chave: Trabalho em altura. Detecção de queda. Dispositivo Eletrônico. Monitoramento. Segurança do Trabalho.

¹Discente Pós- Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho da Univassouras. Eng. de Produção.

²Orientador. Docente da Pós- Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho da Univassoura. Eng. Eletricista

ABSTRACT: In the workplace, Occupational Safety constitutes the field of knowledge dedicated to the in-depth study of the causes and factors that originate accidents and incidents during the execution of work tasks. Given the critical situation that falls from heights are responsible for approximately four out of ten workplace accidents in Brazil, the objective of this project is to systematically and thoroughly analyze new methods of monitoring and supporting occupational safety at heights, highlighting the data collection methodologies adopted. This work developed a systematic literature review methodology, exclusively searching for scientific articles in journals from the Scopus and Web of Science databases published in the last five years, refining the search to 23 articles on the use of devices and sensors in monitoring work at heights. The results of this research show a significant advancement in the use of technologies for monitoring and controlling work at heights, with emphasis on the use of Inertial Measurement Units (IMUs), biometric sensors, computer vision systems, and IoT technologies. It is concluded that the use of wearable sensors and automated systems, such as those based on Inertial Measurement Units (IMUs) and machine learning, represents the main trend for increasing the accuracy and speed in detecting risk situations, ensuring the safety and integrity of workers in activities at height.

Keywords: Working at height. Fall detection. Electronic device. Monitoring. Workplace safety.

RESUMEN: En el ámbito laboral, la seguridad laboral constituye el campo de conocimiento dedicado al estudio en profundidad de las causas y factores que originan accidentes e incidentes durante la ejecución de tareas laborales. Dada la crítica situación de que las caídas en altura son responsables de aproximadamente cuatro de cada diez accidentes laborales en Brasil, el objetivo de este proyecto es analizar sistemática y exhaustivamente nuevos métodos de monitoreo y apoyo a la seguridad laboral en altura, destacando las metodologías de recolección de datos adoptadas. Este trabajo desarrolló una metodología de revisión sistemática de la literatura, buscando exclusivamente artículos científicos en revistas de las bases de datos Scopus y Web of Science publicados en los últimos cinco años, refinando la búsqueda a 23 artículos sobre el uso de dispositivos y sensores en el monitoreo del trabajo en altura. Los resultados de esta investigación muestran un avance significativo en el uso de tecnologías para el monitoreo y control del trabajo en altura, con énfasis en el uso de Unidades de Medición Inercial (IMU), sensores biométricos, sistemas de visión artificial y tecnologías del Internet de las Cosas (IoT). Se concluye que el uso de sensores wearables y sistemas automatizados, como los basados en Unidades de Medida Inercial (IMUs) y machine learning, representa la principal tendencia para incrementar la precisión y rapidez en la detección de situaciones de riesgo, garantizando la seguridad e integridad de los trabajadores en actividades en altura.

2

Palabras clave: Trabajo en altura. Detección de caídas. Dispositivo electrónico. Monitoreo. Seguridad en el trabajo.

INTRODUÇÃO

No ambiente de trabalho é a Segurança do Trabalho que constitui o campo de conhecimento dedicado ao estudo aprofundado das causas e fatores que originam acidentes e incidentes durante a execução de tarefas laborais. Seu escopo de atuação abrange, além da análise de possíveis origens de eventos adversos, a investigação das condições que afetam a

saúde e o bem-estar dos colaboradores, tendo como meta principal o desenvolvimento e a aplicação de medidas eficazes para a prevenção de ocorrências no local de trabalho (BARSANO, 2017).

A Norma Regulamentadora 35 (NR 35) conceitua o trabalho em altura como qualquer atividade laboral desempenhada em um nível superior a dois metros (2 m) do patamar imediatamente inferior, sempre que houver risco de queda. Para garantir a segurança e preservar a saúde dos trabalhadores envolvidos, seja direta ou indiretamente, a NR 35 é responsável por determinar os requisitos mínimos e as medidas de proteção que devem ser observadas, abrangendo desde o planejamento e a organização até a efetiva execução dessas atividades.

De acordo com a NR 35, os Sistemas de proteção contra quedas (SPQ) são necessários sempre que não for possível evitar a atividade de trabalho em altura. Esses sistemas têm como principal objetivo proteger os trabalhadores, seja eliminando o risco de queda ou, caso isso não seja possível, reduzindo os impactos e consequências de uma possível queda. O uso adequado dessas proteções é essencial para garantir a segurança do trabalhador, minimizando os riscos envolvidos nesse tipo de atividade.

Os Sistemas de Proteção Contra Quedas (SPQ) desempenham um papel fundamental na segurança das atividades executadas em altura, sendo constituídos por diferentes medidas e recursos voltados à prevenção de acidentes. Esses sistemas podem englobar soluções de caráter coletivo e individual, adotadas conforme as características do ambiente e o nível de risco existente. As proteções coletivas atuam de forma ampla, criando barreiras físicas e condições seguras de trabalho para todos os profissionais que circulam ou atuam na área, reduzindo significativamente a probabilidade de ocorrência de quedas (BRASIL, 2025).

Ainda segundo a NR 35, o Sistema de Proteção Coletiva Contra Quedas (SPCQ) deve ser a principal escolha ao se definir as medidas de segurança. Tais sistemas compreendem um conjunto de equipamentos, estruturas ou dispositivos cuja função é proteger passivamente e de modo simultâneo todos os profissionais que se encontram em uma área de risco.

A aplicação integrada das proteções coletivas e individuais torna o SPQ mais eficiente e confiável. Enquanto as soluções coletivas promovem um ambiente de trabalho mais seguro de maneira geral, as medidas individuais complementam essa proteção, garantindo segurança personalizada ao trabalhador. Essa combinação contribui para a redução de acidentes, preserva a integridade física dos profissionais e reforça a importância da prevenção em atividades realizadas em altura (ABNT, 2017)..

As atividades executadas em altura estão entre as ocorrências de maior perigo no cenário de segurança ocupacional. O setor da Construção Civil é notoriamente impactado por este risco, registrando uma das maiores taxas de incidentes sérios e fatalidades. No Brasil, segundo o SINTRICOMB (2022), as quedas de altura são responsáveis por cerca de quatro em cada dez acidentes de trabalho. A gravidade é ainda mais acentuada na construção civil, onde uma proporção alarmante de 74% dos acidentes desse tipo tem um desfecho fatal, o que configura um sério desafio de saúde pública. Frente a essa situação crítica, a NR 35 assume um papel crucial ao delinear as diretrizes e proteções mínimas necessárias para o planejamento, organização e execução segura. É vital que sejam aplicadas medidas preventivas rigorosas — como o fornecimento e o uso correto dos Equipamentos de Proteção Individual e Coletiva (EPI e EPC), além de formação e monitoramento contínuo, não só para atender às exigências legais, mas, primordialmente, para proteger vidas e assegurar a integridade física e mental de todos os profissionais.

A Norma Regulamentadora NR-01 estrutura o Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO) como um ciclo dinâmico onde o monitoramento e o controle são fases determinantes para a eficácia do sistema. Após a seleção e implementação das medidas preventivas estabelecidas, seguindo a hierarquia de controle, a norma exige o acompanhamento sistemático do seu desempenho. Este acompanhamento se concretiza através de inspeções periódicas, auditorias e medições ambientais, visando verificar a conformidade e a real adequação das proteções. Os dispositivos de monitoramento e controle dos riscos em altura, também atendem a esta norma.

4

Nesse sentido, o objetivo deste projeto é analisar de forma sistemática e aprofundada as metodologias de coleta de dados adotadas em sistemas de monitoramento e controle do trabalho em altura, a partir de uma revisão da literatura científica recente, considerando os riscos envolvidos e as condições reais às quais os trabalhadores estão expostos. Busca-se identificar os principais tipos de sensores, dispositivos e fontes de dados utilizados. Adicionalmente, o estudo tem como objetivo mapear tendências, lacunas e oportunidades de melhoria nos processos atuais de segurança, contribuindo para a compreensão do caminho evolutivo das soluções tecnológicas — como sensores vestíveis, sistemas de visão computacional e plataformas IoT — voltadas à prevenção de acidentes e à gestão inteligente do trabalho em altura no setor da construção civil e áreas correlatas.

MÉTODOS

Este trabalho adotou como metodologia uma revisão de literatura sistematizada, com o objetivo de analisar as abordagens de coleta de dados empregadas em pesquisas acadêmicas voltadas ao monitoramento e controle do trabalho em altura. A busca bibliográfica foi realizada exclusivamente em artigos científicos publicados em periódicos, não sendo considerados patentes ou pedidos de patentes, de modo a garantir a análise de estudos revisados por pares e com rigor científico consolidado.

Para mostrar o direcionamento que os trabalhos acadêmicos têm tomado as bases de dados selecionadas para este trabalho foram Scopus e Web of Science, por serem reconhecidas internacionalmente pela abrangência e qualidade de seus periódicos nas áreas de engenharia e ciência da computação. A estratégia de busca utilizou combinações de palavras-chave em português e inglês, aplicadas aos campos de título, resumo e palavras-chave, conforme a seguinte expressão: ("trabalho em altura" OU "queda de altura" OU "trabalho em elevação") E ("detecção de queda" OU "monitoramento de segurança" OU monitoramento OU detecção) E (dispositivo* OU sensor* OU vestível* OU "dispositivo eletrônico" OU IoT), bem como seus equivalentes em inglês ("work at height" OR "working at height" OR "fall from height" OR "work at elevation") AND ("fall detection" OR "safety monitoring" OR monitoring OR detection) AND (device* OR sensor* OR wearable* OR "electronic device" OR IoT).

Inicialmente, a aplicação dessa estratégia resultou em 184 artigos. Como critérios de refinamento, foram considerados apenas estudos publicados nos últimos cinco anos e classificados nas áreas de engenharia e ciência da computação, reduzindo o conjunto para 36 artigos. Em seguida, foi realizada a análise dos títulos e resumos, com o objetivo de verificar a aderência temática dos trabalhos ao uso de dispositivos e sensores aplicados ao monitoramento do trabalho em altura cegando a 23 artigos que foram utilizados na pesquisa. Artigos que não apresentavam relação direta com essa temática foram excluídos.

Ao final do processo de seleção, os artigos incluídos foram analisados em profundidade e classificados de acordo com o tipo de sensor ou fonte de dados utilizada no sistema de monitoramento, para fins de comparação e organização dos resultados. Os estudos foram agrupados nas seguintes categorias: Unidade de Medição Inercial (IMU), Monitoramento Biométrico ou Fisiológico, Sistemas de Visão Computacional, e Sensores de Dados Específicos e Internet das Coisas (IoT). Essa classificação permitiu uma análise estruturada das

metodologias adotadas na coleta de dados, bem como a identificação de tendências, lacunas e oportunidades de pesquisa no contexto do monitoramento e controle do trabalho em altura.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quadro de artigos utilizados

Título do Artigo	Autor(es)	Objetivo	Tipo dados	Origem	Ano
Estrutura baseada em aprendizado de máquina para detecção de quedas pré-impacto no mesmo nível e quedas de altura em canteiros de obras usando uma única unidade de medição inercial vestível	Yuhai, O., Cho, Y., Mun, J.H.	Desenvolver e validar uma abordagem baseada em aprendizado de máquina, usando uma única IMU na cintura, para detectar de forma rápida e precisa quedas no mesmo nível e de altura em canteiros de obras, viabilizando sua aplicação em sistemas vestíveis de prevenção de quedas.	Unidade de Medição Inercial	Coreia do Sul	2025
Fusão multimodal para monitoramento da fadiga do trabalhador em ambientes de trabalho em altura.	Ma, J., Li, H., Wang, L., Yu, X., Huang, X.	Desenvolver e validar um método de classificação da fadiga de trabalhadores da construção civil durante tarefas em altura, baseado na fusão de dados multimodais de sensores vestíveis, para melhorar o monitoramento da segurança e reduzir o risco de acidentes por queda.	Sensores fisiológicos.	Hong Kong	2025
Avaliação do risco de queda em altura de trabalhadores da construção civil utilizando dados multifisiológicos e realidade virtual.	Duorinah, FX, Olatunbosun, SO, Ganhou, J.-H., Chi, H.-L., Kim, M.-K.	Desenvolver e avaliar um método automatizado de identificação do risco de quedas em altura de trabalhadores da construção civil, baseado na análise de dados fisiológicos e técnicas de aprendizado de máquina, como alternativa às inspeções manuais tradicionais.	Sensores fisiológicos.	Coreia do Sul	2025
Integração de aprendizado de máquina e um modelo de linguagem de grande escala para construir um grafo de conhecimento de domínio visando reduzir o risco de acidentes por queda de altura.	Zhou, Z., Yu, X., Magoua, JJ., ... Luan, H., Lin, D.	O objetivo do trabalho é desenvolver um grafo de conhecimento específico sobre acidentes por queda em altura para apoiar o projeto, a seleção e o planejamento de sistemas de proteção contra quedas, fornecendo suporte à decisão baseado em dados empíricos para aumentar a segurança em trabalhos em altura.	Análise de dados	China	2025
HAF-YOLO: uma rede eficiente para a detecção de equipamentos de segurança para trabalhos em altura.	Li, D., Liu, B., Gao, Q., ... Yu, X., Li, X.	O objetivo do trabalho é desenvolver um modelo aprimorado de detecção automática para inspeção de equipamentos de segurança utilizados em trabalhos em altura, visando aumentar a precisão, a eficiência computacional e a capacidade de identificar alvos pequenos e delgados em atividades	Visão computacional	China	2025

			de manutenção de torres de transmissão e subestações.			
Aprimorando a segurança dos trabalhadores: Detecção automatizada em tempo real de equipamentos de proteção individual para prevenir quedas em altura em canteiros de obras, utilizando YOLOv8 aprimorado e dispositivos de borda.	Kim, D.,Xiong, S.		O objetivo do trabalho é desenvolver e validar um sistema inteligente de visão computacional, baseado em uma versão aprimorada do modelo YOLOv8, capaz de monitorar em tempo real o uso correto de equipamentos de proteção individual (EPIs) em canteiros de obras, com alta precisão e baixo custo computacional, viabilizando sua aplicação em dispositivos de borda portáteis.	Visão computacional	Coreia do Sul	2025
Algoritmo de detecção inteligente para quedas de altura baseado em máquinas de vetores de suporte.	Chen, C.,Zhang, Z.,Cui, H.,Zhou, J.,Fā, Z.		O objetivo do trabalho é desenvolver um método mais preciso e confiável para detectar quedas de altura na indústria da construção civil, utilizando sensores de aceleração corporal e técnicas de aprendizado de máquina, visando reduzir a ocorrência e a gravidade desses acidentes.	Unidade de Medição Inercial	China	2025
Reconhecimento do comportamento do trabalhador baseado em sensores IMU e construção de um ambiente de sistema ciberfísico	Park, S.,Youm, M.,Kim, J.		O objetivo do trabalho é desenvolver e validar um sensor IMU miniaturizado e um sistema integrado de monitoramento em tempo real capazes de acompanhar atividades, condições de segurança e sinais fisiológicos de trabalhadores da construção civil, permitindo a detecção rápida de situações anormais e o envio imediato de alertas para a prevenção de acidentes, especialmente quedas em altura.	Unidade de Medição Inercial	Coreia do Sul	2025
Aprimorando a segurança de trabalhadores em altura: um modelo de aprendizado profundo para detecção de capacetes e cintos de segurança usando a arquitetura DETR.	Shanti, MZ,Um, B.,Yeun, CY,...Damiani, E.,Kim, T.-Y.		O objetivo do trabalho é desenvolver e avaliar um sistema de monitoramento de atividades em trabalhos em altura capaz de verificar automaticamente o uso de capacetes e cintos de segurança em ambientes de construção, utilizando um modelo de detecção de objetos baseado em transformadores (DETR), visando aumentar a precisão e a confiabilidade da fiscalização de segurança.	Visão computacional	Emirados Árabes Unidos	2025
Desenvolvimento de um sistema de controle de riscos de segurança baseado em capacete de segurança inteligente para a produção de petróleo e gás.	Ma, L.,Du, C.,Zhao, H.,Kang, W.		O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema inteligente de controle e prevenção de riscos de segurança para ambientes de alto risco na indústria de petróleo e gás, baseado em capacetes de segurança inteligentes, capaz de identificar comportamentos perigosos, monitorar condições ambientais e reduzir o tempo de resposta a acidentes.	Unidade de Medição Inercial	China	2025

Avaliação da eficácia de um dispositivo de sinalização em situações de perda de equilíbrio.	Revoredo, R., Estolano, A., Mendes, F., Lago, EMG, Santos, A.	O objetivo da pesquisa foi verificar a viabilidade do uso do dispositivo W6 Smart Beacon para identificar situações de perda de equilíbrio em trabalhos em altura e emitir alertas automáticos ao responsável pela supervisão, contribuindo para a gestão do risco de acidentes na construção civil.	Unidade de Medição Inercial	Brasil	2025
Pesquisa sobre o projeto de um sistema inteligente de alerta vestível para trabalhos em altura.	Wang, Y., Sol, Y., Lu, Z., Liu, F., Wang, W.	O objetivo do trabalho é desenvolver e avaliar um sistema vestível inteligente, baseado em capacete de segurança, capaz de monitorar em tempo real a fadiga do trabalhador e as condições ambientais em atividades em altura, com o intuito de reduzir a ocorrência de acidentes de trabalho.	Unidade de Medição Inercial	China	2024
Reconhecimento do estado de fixação de ganchos de segurança baseado na similaridade de movimento por meio de redes neurais siamesas profundas.	Canção, K.-S., Lim, J.G., Lee, D.-G., Kwon, D.-S.	O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema de monitoramento mais preciso para prevenir quedas em altura em canteiros de obras, por meio do reconhecimento do estado de fixação do gancho de segurança, superando as limitações de desempenho de métodos anteriores.	Unidade de Medição Inercial	Coreia do Sul	2023
Método de detecção de instabilidade para trabalhadores da construção civil que trabalham em altitude com base no modelo de mistura gaussiana	Fā, W., Lin, X., Zuo, C., Xu, X., Zhou, J.	O objetivo do trabalho é desenvolver um método personalizado de detecção em tempo real do estado de instabilidade de trabalhadores da construção civil em atividades em altura, considerando as diferenças individuais de movimento, para prevenir acidentes por queda e apoiar ações de correção e treinamento personalizados.	Unidade de Medição Inercial	China	2023
Detecção automatizada de trabalhos de construção em altura e acionamento de ganchos de segurança utilizando IMU com barômetro.	Choo, H., Lee, B., Kim, H., Choi, B.	O objetivo do trabalho é desenvolver e validar um sistema automatizado, baseado em sensores vestíveis, capaz de identificar trabalhadores em atividades em altura e detectar o estado de fixação dos ganchos de segurança de forma não invasiva, visando prevenir quedas em canteiros de obras.	Unidade de Medição Inercial	Coreia do Sul	2023
Sistema IoT para Monitoramento de Trabalhadores em Altura ^a Sistema IoT para Monitoramento de Trabalhadores em Alturas	Martínez-Martínez, DC., Riaño-Jaramillo, MC., Mendez-Chaves, D., González-Correal, A., Narducci-Marín, M.	O objetivo do trabalho é projetar, desenvolver e validar um protótipo de sistema baseado em Internet das Coisas (IoT) para monitorar, em tempo real, variáveis fisiológicas e de segurança de trabalhadores em atividades em altura, visando detectar situações de risco e contribuir para a prevenção de acidentes e problemas de saúde.	Sensores fisiológicos.	Colômbia	2023
Detecção de quedas em altura utilizando aprendizado profundo baseado em dados de	Lee, S., Koo, B., Yang,	O objetivo do trabalho é prever o risco de quedas fatais em altura em canteiros de obras, com base na análise de dados de sensores IMU, utilizando	Unidade de Medição Inercial	Coreia do Sul	2022

sensores IMU para prevenção de acidentes em canteiros de obras.	S.,Nam, Y.,Kim, Y.	modelos de aprendizado profundo para estimar a gravidade da queda a partir da aceleração máxima do corpo.			
Prevenção de quedas em andaimes utilizando visão computacional e monitoramento baseado em IoT.	Khan, M.,Khalid, R.,Anjum, S.,Trans, SV-T.,Park, C.	O objetivo do trabalho é desenvolver e validar um sistema inteligente de monitoramento do uso de ganchos de segurança para prevenir quedas de altura na construção civil, automatizando a identificação de comportamentos inseguros por meio da integração de visão computacional e tecnologias IoT, de forma a reduzir a dependência do monitoramento manual.	Visão computacional	Coreia do Sul	2022
Prevenção de quedas em altura na construção civil utilizando um sistema de IoT baseado em linguagem de marcação difusa e JFML.	Rey-Merchán, MC,López-Arquillos, A.,Soto-Hidalgo, JM	O objetivo do trabalho é desenvolver e avaliar um sistema inteligente que integre Internet das Coisas (IoT) e lógica fuzzy para apoiar a tomada de decisões na gestão do uso de cintos de segurança, visando reduzir acidentes por quedas em altura na construção civil.	Visão Computacional	Espanha	2022
Monitoramento de ganchos de segurança baseado em etiquetas e IoT para prevenção de quedas em altura.	Khan, M.,Khalid, R.,Anjum, S.,Cho, S.,Park, C.	O objetivo do trabalho é desenvolver e implementar um sistema híbrido inteligente para monitorar, em tempo real, o uso correto de ganchos de segurança por trabalhadores da construção civil em atividades em altura, integrando tecnologias de visão computacional e Internet das Coisas, de modo a reduzir comportamentos inseguros e prevenir acidentes por queda em canteiros de obras.	Visão Computacional	Emirados Árabes Unidos	2022
Melhorar a prevenção de quedas em altura em canteiros de obras através da combinação de tecnologias.	Rey-Merchán, MDC,Gómez-de-Gabriel, JM,Fernández-Madrigal, J.-A.,López-Arquillos, A.	O objetivo do trabalho é analisar as limitações dos sistemas de monitoramento do uso de cintos de segurança baseados exclusivamente em Bluetooth Low Energy (BLE) na construção civil e identificar soluções alternativas, a partir da literatura, para aumentar a eficácia desses sistemas na prevenção de quedas em altura.	Visão Computacional	Espanha	2022
Dispositivo inteligente de monitoramento online para cintos de segurança em operações em grandes altitudes.	Yi, J.,Liu, B.,Ele, D.,Ou, M.,Duan, T.	O objetivo do trabalho é desenvolver um sistema inteligente de monitoramento on-line do uso de cintos de segurança em trabalhos em altura, com o intuito de aumentar a conscientização dos trabalhadores, reforçar o controle da segurança em campo e reduzir acidentes por quedas em grandes alturas.	Unidade de Medição Inercial	China	2022
Gancho de segurança inteligente baseado em IMU para prevenção de	Khan, M.,Khalid, R.,Anjum, S.,Khan,	O objetivo do trabalho é desenvolver e avaliar um sistema de Gancho de Segurança Inteligente (GSI) capaz de identificar automaticamente, em	Unidade de Medição Inercial	Coreia do Sul	2021

quedas em canteiros de obras	N., Parque, C.	tempo real, se o gancho de segurança do trabalhador está corretamente preso, visando reduzir acidentes por queda em altura em canteiros de obras.			
------------------------------	----------------	---	--	--	--

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados desta pesquisa evidenciam um avanço significativo no uso de tecnologias para o monitoramento e controle do trabalho em altura, refletindo a crescente preocupação da comunidade científica com a prevenção de acidentes por quedas. A análise dos estudos selecionados demonstra que, nos últimos anos, houve uma intensificação no desenvolvimento e na aplicação de sistemas baseados em sensores, dispositivos vestíveis, Internet das Coisas (IoT) e visão computacional, com o objetivo de substituir ou complementar métodos tradicionais de inspeção e supervisão manual. Observa-se que a maioria das pesquisas se concentra na coleta de dados em tempo real, buscando maior precisão, rapidez na detecção de situações de risco e apoio à tomada de decisão em segurança do trabalho.

De modo geral, os resultados revelam que as metodologias adotadas variam conforme o tipo de tecnologia empregada, sendo possível identificar padrões recorrentes na escolha dos sensores e nas estratégias de processamento dos dados. Unidades de Medição Inercial (IMU), sensores biométricos, sistemas de visão computacional e sensores específicos integrados a plataformas IoT destacam-se como as principais abordagens utilizadas para monitorar postura, movimento, uso de equipamentos de proteção e condições fisiológicas dos trabalhadores.

Unidades de Medição Inercial (IMUs)

Unidades de Medição Inercial (IMUs) são sistemas de sensores que medem o movimento em múltiplos eixos e se tornaram componentes muito comuns, integrados até em placas de microcontroladores como o Arduino. Uma IMU geralmente é composta por três tipos de sensores: acelerômetros, que medem a variação da aceleração para determinar inclinação ou força de impacto; giroscópios, que medem a variação do movimento angular e rotação; e magnetômetros, que medem a força magnética, geralmente para determinar a direção da bússola usando o campo gravitacional da Terra.

No estudo de Yuhai, Cho e Mun (2025), a metodologia envolveu o desenvolvimento de um dispositivo vestível personalizado com sensor único baseado em um módulo IMU MPU-6050, capaz de registrar aceleração e giroscopia triaxiais a 40 Hz, integrando pré-processamento e transmissão sem fio via Bluetooth, demonstrando uma abordagem prática de coleta de dados de movimento em tempo real. De maneira semelhante, Chen et al. (2025) utilizaram sensores

triaxiais de aceleração para extrair características matemáticas dos movimentos corporais, aplicando algoritmos de SVM para detectar quedas, evidenciando o uso de processamento de sinais aliado à aprendizagem de máquina.

Complementando essas abordagens, Park, Youm e Kim (2025) desenvolveram um sensor IMU miniaturizado instalado em múltiplas partes do corpo, incorporando sensores fisiológicos e ambientais, com dados pré-processados por filtros de Kalman e integrados a um sistema ciberfísico para monitoramento contínuo e envio de alertas, ampliando a capacidade de monitoramento individual e em tempo real. Em paralelo, Ma et al. (2025) propuseram um sistema de quatro camadas (borda-terminal-nuvem-usuário) com capacetes inteligentes equipados com sensores multimodais e módulos de posicionamento híbrido, utilizando redes neurais LSTM para previsão de riscos, demonstrando a aplicação de sistemas complexos integrados para análise preditiva em ambientes industriais.

A detecção de perda de equilíbrio foi abordada por Revoredo et al. (2025) por meio do dispositivo W6 Smart Beacon, com dados processados pelo Node-RED, permitindo avaliar o impacto do posicionamento do sensor no corpo e a capacidade de alertar em tempo real. De forma complementar, Wang et al. (2024) desenvolveram capacetes inteligentes baseados em ESP32, monitorando fadiga e condições ambientais, com integração à nuvem via Alibaba Cloud IoT, destacando a aplicação de plataformas de gestão remota para suporte à decisão.

Quanto à aplicação de aprendizado profundo, Song et al. (2023) utilizaram redes neurais siamesas para analisar dados de dois sensores IMU e determinar a fixação correta de ganchos de segurança, enquanto Choo et al. (2023) integraram IMU e barômetro para estimar altitude e classificar o estado de fixação dos ganchos de segurança usando algoritmos de aprendizado de máquina, validando o sistema com 20 trabalhadores e adotando validação leave-one-subject-out para robustez. Lee et al. (2022) aplicaram sensores IMU na região T7 do tronco para medir aceleração durante diferentes tipos de movimento, utilizando modelos de aprendizado profundo (1D-CNN, 2D-CNN, LSTM, Conv-LSTM) para prever o risco de quedas fatais, indicando o valor do processamento avançado de sinais para avaliação de risco.

Métodos de monitoramento de equipamentos de proteção individual foram abordados por Khan et al. (2021), que coletaram dados de ganchos de segurança com sensores IMU e treinaram algoritmos de aprendizado de máquina para classificar o estado do gancho, e por Yi et al. (2022), que projetaram sistemas eletrônicos integrados para monitoramento remoto de

cintos de segurança, combinando detecção de deslocamento, sensores de tensão, alarmes sonoros e comunicação GPRS.

Os trabalhos analisados nessa vertente evidenciam um movimento crescente no setor da construção civil em direção à integração de sensores vestíveis, IMUs, sensores fisiológicos, barômetros, visão computacional e algoritmos de aprendizado de máquina, permitindo monitoramento contínuo, avaliação de risco em tempo real e suporte à decisão para prevenção de acidentes em altura. Cada metodologia apresenta seu enfoque particular — seja na coleta precisa de dados individuais, na análise preditiva de riscos ou no monitoramento de EPIs —, demonstrando que soluções tecnológicas podem ser combinadas para aumentar a segurança de maneira eficiente e escalável.

Monitoramento Biométrico - Dados Fisiológicos

A análise comparativa das metodologias adotadas relacionadas aos monitoramentos biométricos do trabalho em altura, são observados nos trabalhos de Ma et al. (2025), Duorinah et al. (2025) e Damián Camilo Martínez-Martínez et al. (2023) evidencia abordagens avançadas para o monitoramento de trabalhadores em altura, com foco em sinais fisiológicos e condições de segurança.

No estudo de Ma et al. (2025), a metodologia envolveu a utilização de sensores vestíveis multimodais, com o colete EQo2 lifeMonitor registrando frequência cardíaca, respiratória e temperatura da pele via ECG, sensores de respiração e temperatura, garantindo medições confiáveis mesmo durante o movimento. Complementarmente, a faixa de cabeça Muse S foi usada para aquisição de sinais de EEG a 256 Hz, transmitidos sem fio para dispositivos móveis, permitindo monitoramento contínuo e sincronizado durante tarefas experimentais.

Duorinah et al. (2025) aplicaram essa coleta de sinais fisiológicos em um experimento de realidade virtual com três cenários de risco de queda em altura. Foram registrados quatro tipos de sinais fisiológicos, incluindo EEG, que serviram como entradas para algoritmos de aprendizado de máquina, permitindo o desenvolvimento e avaliação de modelos de classificação de risco. O estudo também comparou o desempenho das métricas fisiológicas individualmente e combinadas, demonstrando a importância da análise multimodal para avaliação de riscos.

Por sua vez, Damián Camilo Martínez-Martínez et al. (2023) desenvolveram um protótipo IoT voltado ao monitoramento em tempo real, integrando sensores de plethysmografia

para frequência cardíaca e oxigenação sanguínea, barômetro para estimativa de altura e sensor de pressão para verificar a fixação do mosquetão. Todos os sensores foram conectados a uma arquitetura eletrônica dedicada, permitindo a aquisição, processamento e envio dos dados para a nuvem. O desempenho do sistema foi validado experimentalmente, analisando os erros de medição e a confiabilidade do monitoramento.

Em síntese, as três metodologias que utilizaram monitoramento biométrico demonstram o uso crescente de sensores fisiológicos e IoT para monitoramento de trabalhadores em altura, combinando aquisição de dados em tempo real, análise preditiva e integração tecnológica para prevenção de acidentes. Enquanto Ma et al. e Duorinah et al. focam na avaliação do risco de queda por meio de sinais fisiológicos em tarefas simuladas, Martínez-Martínez et al. priorizam a aplicação prática com protótipos IoT capazes de monitoramento contínuo e remoto, evidenciando diferentes enfoques complementares na segurança ocupacional.

Sistemas de Visão Computacional

Estes sistemas utilizam a captura de luz (espectro visível ou não) para inferir informações sobre o estado do trabalhador, ambiente e equipamento. A análise comparativa das metodologias adotadas nos trabalhos de Zhou et al. (2025), Li et al. (2025), Kim & Xiong (2024), Shanti et al. (2025) e Khan et al. (2022) evidencia abordagens complementares voltadas à prevenção de acidentes por quedas em altura, focadas em sistemas inteligentes de monitoramento e análise de dados.

13

No estudo de Zhou et al. (2025), a metodologia baseou-se na construção de um grafo de conhecimento sobre acidentes por quedas em altura, utilizando uma abordagem híbrida de processamento de linguagem natural. Foram combinadas extração manual, reconhecimento de entidades, segmentação de texto e extração de relações baseada em regras, apoiadas em uma ontologia definida por especialistas. Técnicas de mineração de texto, aprendizado de máquina e modelos de linguagem foram aplicadas para classificar tipos de quedas, refinar cenários de acidentes e identificar causas, a partir de normas de equipamentos de proteção e relatórios de investigação de acidentes, resultando em um conjunto estruturado de entidades e relações cuja eficácia foi validada por estudos de caso.

Li et al. (2025) e Kim & Xiong (2024) focaram na aplicação de sistemas de visão computacional para inspeção automática do uso correto de equipamentos de proteção

individual (EPIs). Ambos os trabalhos adaptaram o modelo de detecção de imagens YOLOv8, tornando-o mais leve, rápido e preciso, especialmente para identificar objetos pequenos, como cintos e capacetes. Os modelos foram treinados com imagens reais de canteiros de obras, testados em diferentes bases de dados, e comparados com modelos tradicionais, apresentando alta precisão e confiabilidade na detecção de EPIs, com eficiência computacional aprimorada. No caso de Kim & Xiong, o sistema ainda foi implementado em dispositivos portáteis, garantindo operação em tempo real sem comprometer a privacidade dos trabalhadores.

Shanti et al. (2025) exploraram a utilização do modelo DETR para detecção de capacetes e cintos de segurança em imagens de canteiros de obras. O desempenho foi avaliado com métricas padrão de detecção e testado sob diferentes condições visuais, como iluminação variável, poeira, desfoque, imagens em tons de cinza e capturadas por drones. O modelo foi comparado com YOLOv3, YOLOv8 e Deformable DETR, mostrando maior robustez e precisão frente às limitações dos métodos tradicionais.

No trabalho desenvolvido por Khan et al. (2022) integraram visão computacional com IoT, utilizando imagens de CFTV para identificar trabalhadores e zonas de risco, e sensores vestíveis (IMU e altímetro) para monitorar fixação de ganchos e altura do trabalhador. O sistema foi validado em cinco cenários reais de trabalho, com avaliação de precisão de detecção e classificação em tempo real, capacidade de emitir alertas automáticos e operação em baixo consumo de energia.

14

Essas metodologias demonstram a convergência entre processamento de linguagem natural, visão computacional e IoT para monitoramento de trabalhadores em altura. Enquanto Zhou et al. oferecem uma abordagem de conhecimento estruturado e análise de acidentes históricos, Li et al., Kim & Xiong e Shanti aplicam técnicas avançadas de reconhecimento de imagens para inspeção automática de EPIs, e Khan et al. integram sensores vestíveis e CFTV para monitoramento em tempo real, evidenciando múltiplas soluções complementares para reduzir riscos e melhorar a segurança ocupacional.

Perspectivas futuras

Como perspectivas para trabalhos futuros, destaca-se a necessidade de ampliar a integração entre sensores inerciais, fisiológicos, ambientais e de localização, permitindo uma avaliação mais completa e contextualizada dos riscos no trabalho em altura. Também é relevante o desenvolvimento de modelos adaptativos e personalizados, capazes de considerar a

heterogeneidade individual dos trabalhadores e aprender continuamente a partir de seus próprios dados, reduzindo falsos alarmes e aumentando a confiabilidade dos sistemas. Além disso, recomenda-se a realização de validações em canteiros de obras reais, de grande escala e por períodos prolongados, a fim de avaliar aspectos como robustez, consumo energético, escalabilidade e aceitação pelos usuários. A integração desses sistemas com plataformas BIM e sistemas de gestão de obras surge como um caminho promissor para potencializar a análise espacial dos riscos e o planejamento preventivo. Por fim, pesquisas futuras devem contemplar questões humanas, éticas e regulatórias, bem como avançar na automação de respostas e ações corretivas, visando a criação de sistemas de segurança cada vez mais inteligentes, autônomos e alinhados às práticas modernas de gestão da segurança do trabalho.

CONCLUSÃO

De forma conjunta, os projetos analisados demonstram que o monitoramento e o controle do trabalho em altura são fundamentais para a prevenção de acidentes graves e fatais. A adoção de tecnologias inteligentes — como sensores vestíveis, visão computacional, IoT e aprendizado de máquina — permite superar as limitações dos métodos tradicionais, oferecendo detecção em tempo real, alertas precoces e suporte à decisão. Além de aumentar a segurança física dos trabalhadores, essas soluções contribuem para uma cultura preventiva, uma gestão mais eficiente dos riscos e a evolução da segurança do trabalho rumo a sistemas mais inteligentes, automatizados e centrados no ser humano.

Os estudos analisados ao longo deste conjunto de pesquisas evidenciam de forma consistente que o trabalho em altura permanece como uma das atividades mais críticas e letais na indústria da construção civil e em ambientes industriais. Apesar da ampla disponibilidade de normas, procedimentos e equipamentos de proteção individual, a recorrência de acidentes demonstra que medidas tradicionais, baseadas apenas em inspeções manuais e treinamentos pontuais, são insuficientes para lidar com a complexidade, variabilidade e dinamicidade desses ambientes.

Nesse contexto, os trabalhos revisados mostram um avanço significativo no uso de tecnologias inteligentes para monitoramento e controle do trabalho em altura, destacando-se sensores vestíveis, sensores fisiológicos e ambientais, unidades de medição inercial (IMU), visão computacional, Internet das Coisas (IoT) e algoritmos de aprendizado de máquina e aprendizado profundo. Essas abordagens possibilitam a detecção automática e em tempo real de

comportamentos inseguros, uso inadequado de EPIs, estados de fadiga, perda de equilíbrio e quedas iminentes, promovendo uma mudança de paradigma: da segurança reativa para a segurança preventiva e preditiva.

Os resultados obtidos nos diferentes estudos indicam elevados níveis de precisão, confiabilidade e robustez, mesmo em condições adversas, como ambientes externos, variações de iluminação, poeira, interferências eletromagnéticas e diversidade de perfis individuais. A integração de dados multimodais mostrou-se essencial para capturar a complexidade do risco em trabalhos em altura, permitindo análises mais completas e personalizadas. Além disso, os sistemas híbridos, que combinam IoT, visão computacional, computação em nuvem e plataformas web, demonstraram grande potencial para escalabilidade, monitoramento simultâneo de múltiplos trabalhadores e apoio à tomada de decisão por gestores de segurança.

Outro aspecto relevante é o avanço de abordagens baseadas em modelos preditivos, lógica fuzzy e grafos de conhecimento, que ampliam o papel dessas tecnologias para além da simples detecção de eventos, passando a oferecer suporte estratégico ao planejamento de segurança, à definição de medidas corretivas e ao desenvolvimento de treinamentos personalizados. Dessa forma, a segurança do trabalho em altura deixa de ser apenas uma obrigação normativa e passa a ser tratada como um sistema inteligente, integrado e orientado por dados.

16

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16325: Dispositivos de ancoragem para trabalho em altura. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BARSANO, Paulo Roberto. Segurança do trabalho para concurso público. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora n. 01 (NR 01): Disposições gerais e gerenciamento de riscos ocupacionais. [S.l.]: MTE, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-01-atualizada-2025-i-3.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora n. 35 (NR 35): Trabalho em altura. [S.l.]: MTE, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-35-atualizada-2025.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2025.

CHEN, C. et al. Intelligent detection algorithm for fall from height based on support vector machines. *Journal of Information Processing Systems*, v. 21, n. 1, p. 71–79, 3 mar. 2025.

CHOI, H. et al. Automated detection of construction work at heights and deployment of safety hooks using IMU with a barometer. v. 147, p. 104714–104714, 1 mar. 2023.

DAMIÁN CAMILO MARTÍNEZ-MARTÍNEZ et al. IoT system for monitoring of workers at height. *Ingeniería y universidad*, v. 27, 17 nov. 2023.

DUORINAAH, F. X. et al. Assessment of construction workers' fall-from-height risk using multi-physiological data and virtual reality. *Automation in Construction*, v. 176, p. 106254, ago. 2025.

KHAN, M. et al. Fall prevention from scaffolding using computer vision and IoT-based monitoring. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 148, n. 7, jul. 2022.

KHAN, M. et al. IMU based smart safety hook for fall prevention at construction sites. 2021 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP), 23 ago. 2021.

KHAN, M. et al. Tag and IoT based safety hook monitoring for prevention of falls from height. *Automation in Construction*, v. 136, p. 104153, abr. 2022.

KIM, D.; XIONG, S. Enhancing worker safety: real-time automated detection of personal protective equipment to prevent falls from heights at construction sites using improved YOLOv8 and edge devices. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 151, n. 1, 29 out. 2024.

17

KIM, Y. et al. Detection of pre-impact falls from heights using an inertial measurement unit sensor. *Sensors*, v. 20, n. 18, p. 5388, 20 set. 2020.

LEE, S. et al. Fall-from-height detection using deep learning based on IMU sensor data for accident prevention at construction sites. *Sensors*, v. 22, n. 16, p. 6107, 16 ago. 2022.

LI, D. et al. HAF-YOLO: an efficient network for the detection of safety equipment for working at heights. *Signal Image and Video Processing*, v. 19, n. 5, 11 mar. 2025.

MA, J. et al. Multimodal fusion for monitoring worker fatigue in elevated work environments. *Advanced Engineering Informatics*, v. 67, p. 103565–103565, 20 jun. 2025.

MA, L. et al. Development of safety risk control system based on smart safety helmet for oil and gas production. p. 19–24, 13 jun. 2025.

PARK, S.; YOUM, M.; KIM, J. IMU sensor-based worker behavior recognition and construction of a cyber-physical system environment. *Sensors*, v. 25, n. 2, p. 442, 13 jan. 2025.

REVOREDO, R. et al. Evaluation of the effectiveness of a beacon device in situations of loss of balance. *Studies in Systems, Decision and Control*, p. 229–238, 2025.

REY-MERCHÁN, M. DEL C.; LÓPEZ-ARQUILLOS, A.; SOTO-HIDALGO, J. M. Prevention of falls from heights in construction using an IoT system based on fuzzy markup language and JFML. *Applied Sciences*, v. 12, n. 12, p. 6057, 1 jan. 2022.

REY-MERCHÁN, M. DEL C. et al. Improving the prevention of fall from height on construction sites through the combination of technologies. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, p. 1–10, 18 set. 2020.

SHANTI, M. Z. et al. Enhancing worker safety at heights: a deep learning model for detecting helmets and harnesses using DETR architecture. *IEEE Access*, v. 13, p. 151788–151802, 1 jan. 2025.

SINTRICOMB. Estudo mostra que 40% dos acidentes de trabalho no Brasil são por queda de altura. 07 abr. 2022. Disponível em: <https://sintricomb.com.br/estudo-mostra-que-40-dos-acidentes-de-trabalho-no-brasil-sao-por-queda-de-altura/>. Acesso em: 13 fev. 2025.

SONG, K.-S. et al. Motion similarity-based safety hook fastening state recognition via deep siamese neural networks. *IEEE Sensors Letters*, v. 7, n. 10, p. 1–4, out. 2023.

WANG, Y. et al. Research on design of intelligent wearable warning system for work at heights. 2024 5th International Conference on Intelligent Design (ICID), p. 380–387, 25 out. 2024.

YI, J. et al. An intelligent on-line monitoring device for safety belt under high-altitude operation. v. 12, p. 1–6, 1 dez. 2022.

ZHOU, Z. et al. Integrating machine learning and a large language model to construct a domain knowledge graph for reducing the risk of fall-from-height accidents. *Accident Analysis & Prevention*, v. 215, p. 108009–108009, 20 mar. 2025.