

Termografia Infravermelha Quantitativa na Detecção de Biomarcadores Térmicos de Sobrecarga Musculoesquelética na Indústria Metalúrgica: Um Estudo Piloto Metodológico

Claudia Valéria Silvestre Rêgo Lacerda¹, Gabriel Gastélum-Cuadras², José Alberto Frade Martins Parraça³, Jani Cleria Pereira Bezerra^{1,4}, Davi Silva Fernandes⁵, Ronaldo Vivone Varejão¹, Karollyni Bastos Andrade Dantas⁵ e Estélio Henrique Martin Dantas^{1,5}



<https://doi.org/10.36557/2674-9432.2026v5n6p40-57>

Artigo recebido em 1 de Junho e publicado em 2 de Agosto de 2026

ARTIGO ORIGINAL DE PESQUISA

RESUMO

Introdução: O setor metalúrgico é caracterizado por processos produtivos que impõem elevadas cargas biomecânicas, expondo os trabalhadores a riscos ergonômicos e ao desenvolvimento de Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT). A detecção precoce dessas alterações é frequentemente limitada pela subjetividade das avaliações convencionais. **Objetivo:** Avaliar a viabilidade técnica da termografia infravermelha (TIV) na identificação de assimetrias térmicas em um operador de esmerilhadeira na indústria metalúrgica. **Métodos:** Foi realizado um estudo piloto metodológico e quantitativo. Um sensor infravermelho (FLIR C3) foi utilizado para capturar imagens da cintura escapular durante a jornada de trabalho, seguindo um rigoroso protocolo de controle ambiental (21 °C) e emissividade da pele (0,98). O parâmetro principal foi o gradiente térmico contralateral (ΔT), correlacionado com a tarefa ocupacional e a Escala Visual Analógica (EVA). **Resultados:** A análise demonstrou alta estabilidade intrassessão (CV < 0,1%). Uma assimetria térmica significativa de 0,56 °C foi identificada, com o membro superior direito (33,44 °C) apresentando temperatura superior à do membro contralateral (32,88 °C). Esse diferencial é classificado como uma alteração de leve a moderada, indicando sobrecarga funcional e estresse mecânico no membro dinâmico utilizado na tarefa. A percepção de dor relatada (EVA 6,0) convergiu com os achados térmicos. **Conclusão:** A termografia infravermelha mostrou-se uma ferramenta de sensoriamento objetiva e eficaz para a identificação de biomarcadores térmicos de sobrecarga musculoesquelética. O protocolo validado permite o rastreamento de processos inflamatórios incipientes, servindo como uma ferramenta estratégica para a gestão ergonômica preventiva no contexto da Indústria 4.0.

Palavras-chave: Termografia Infravermelha; Sensoriamento; Ergonomia; Saúde Ocupacional; DORT.

ABSTRACT

Introduction: The metallurgical sector is characterized by production processes that impose high biomechanical loads, exposing workers to ergonomic risks and the development of Work-Related Musculoskeletal Disorders (WMSDs). Early detection of these alterations is often limited by the subjectivity of conventional assessments.

Objective: To evaluate the technical feasibility of infrared thermography (IRT) in identifying thermal asymmetries in an angle grinder operator within the metallurgical industry. **Methods:** A quantitative methodological pilot study was conducted. An infrared sensor (FLIR C3) was used to capture images of the shoulder girdle during the work shift, following a rigorous protocol for environmental control (21°C) and skin emissivity (0.98). The primary parameter was the contralateral thermal gradient (ΔT), correlated with the occupational task and the Visual Analogue Scale (VAS). **Results:** The analysis demonstrated high intra-session stability ($CV < 0.1\%$). A significant thermal asymmetry of 0.56 °C was identified, with the right upper limb (33.44 °C) showing a higher temperature than the contralateral limb (32.88 °C). This differential is classified as a mild-to-moderate alteration, indicating functional overload and mechanical stress in the dynamic limb used for the task. The reported pain perception (VAS 6.0) converged with the thermal findings. **Conclusion:** Infrared thermography proved to be an objective and effective sensing tool for identifying thermal biomarkers of musculoskeletal overload. The validated protocol allows for the screening of incipient inflammatory processes, serving as a strategic tool for preventive ergonomic management in the Industry 4.0 framework.

Keywords: Infrared Thermography; Sensing; Ergonomics; Occupational Health; WMSDs.

Instituição afiliada

1 Programa de Pós-Graduação em Enfermagem e Biociências, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – UNIRIO, Rio de Janeiro, Brasil; <https://orcid.org/0000-0003-0867-2461> / claudiavaleriasilvestre@edu.unirio.br / ronaldovarejao@edu.unirio.br e <https://orcid.org/0000-0002-1281-3645> /

2 Universidade Autónoma de Chihuahua, Faculdade de Ciências da Cultura Física, México; <https://orcid.org/0000-0002-8931-1125> / gastelum@uach.mx

3 Universidade de Évora, Centro de Investigação em Saúde Abrangente (CHRC); <https://orcid.org/0000-0002-5254-7409> / jparraca@uevora.pt

4 Doutorado em Ciências, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – UNIRIO; Universidade de Vassouras, Rio de Janeiro, Brasil; <https://orcid.org/0000-0001-6247-5480> / j.cleria@gmail.com

5 Programa de Pós-Graduação em Biociências e Saúde – PBS, Universidade Tiradentes – UNIT, Aracaju, Brasil; <https://orcid.org/0009-0007-5086-6696> / davisfba@gmail.com , <https://orcid.org/0000-0001-6886-6976> / karollbdantas@gmail.com e <https://orcid.org/0000-0003-0981-8020> / estelio.dantas@unirio.br

Autor correspondente: Claudia Valéria Silvestre Rêgo Lacerda

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



1 INTRODUÇÃO

A transição global em direção à Indústria 4.0 redefiniu as relações de trabalho ao integrar sistemas inteligentes e processos de alta eficiência. No entanto, essa aceleração impôs novas exigências cognitivas e físicas, aumentando significativamente o risco de estresse ocupacional e exaustão física [1,2]. Em ambientes industriais, a alta densidade de tarefas e os cenários desafiadores criam um contexto em que o monitoramento da carga de trabalho em tempo real é vital para prevenir o declínio do desempenho e danos irreversíveis à saúde do trabalhador [3,4]. Embora o setor metalúrgico permaneça como um pilar da economia global, ele é caracterizado por processos de alta intensidade e riscos ocupacionais específicos, particularmente em contextos onde a infraestrutura digital e a resistência cultural ainda representam barreiras para a modernização tecnológica [5].

O ambiente de trabalho industrial é um fator decisivo na qualidade de vida. A exposição à sobrecarga de tarefas, atividades repetitivas por ciclos prolongados e deficiências ergonômicas sujeita os trabalhadores a severas vulnerabilidades [6]. Especificamente nas operações metalúrgicas, como fundição e acabamento, a natureza das tarefas exige um monitoramento rigoroso para garantir a integridade física contra perigos inerentes [7]. A pressão e a volatilidade do mercado intensificaram a fadiga dos trabalhadores, exigindo soluções de monitoramento para mitigar os riscos à saúde física e mental. Esses processos produtivos frequentemente requerem esforços físicos estereotipados e posturas estáticas prolongadas [8], que atuam como catalisadores para os Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (DORT). Atualmente, os DORTs representam uma das maiores prevalências de morbidade ocupacional em todo o mundo e são os principais determinantes da incapacidade laboral [9,10].

No centro desse cenário está o desafio do manejo da dor. A dor é uma experiência sensorial e emocional complexa, influenciada por fatores biológicos, psicológicos e sociais [11]. Na indústria metalúrgica, a dor crônica frequentemente resulta de processos inflamatórios subclínicos induzidos por esforço repetitivo [12]. Embora a intervenção fisioterapêutica seja essencial para a saúde do trabalhador [13],

as avaliações ergonômicas convencionais enfrentam uma limitação crítica: a forte dependência de relatos subjetivos, como a Escala Visual Analógica (EVA), o que pode dificultar o diagnóstico precoce e atrasar a intervenção preventiva. Há uma clara necessidade de métodos de sensoriamento objetivos que possam identificar a sobrecarga musculoesquelética antes que os sintomas clínicos se manifestem.

A termografia infravermelha (TIV) surgiu como uma tecnologia de sensoriamento funcional e não invasiva, capaz de mapear a distribuição da temperatura cutânea. Ao converter a radiação infravermelha em dados térmicos quantitativos, a TIV identifica alterações microcirculatórias e adaptações do fluxo sanguíneo associadas à fadiga muscular e à inflamação subclínica [14,15]. Uma controvérsia persistente nessa área diz respeito à confiabilidade da TIV em ambientes industriais reais comparados a ambientes de laboratório controlados, devido a variáveis ambientais como a emissividade e a interferência térmica ambiental.

Apesar do crescente interesse pela TIV em contextos clínicos e esportivos, existe uma lacuna significativa de estudos que validem protocolos padronizados de aquisição e análise em ambientes ocupacionais reais e de alta demanda, especialmente na indústria metalúrgica. Portanto, este estudo tem como objetivo analisar a capacidade da termografia infravermelha em identificar alterações musculoesqueléticas em um operador de esmerilhadeira. Nossos achados demonstram que a TIV, quando apoiada por um protocolo rigoroso de sensoriamento, pode detectar objetivamente biomarcadores térmicos de sobrecarga funcional, servindo como uma ferramenta estratégica para a gestão ergonômica preventiva.

2 Materiais e Métodos

2.1. Delineamento do Estudo

Este estudo caracteriza-se como um estudo piloto metodológico, quantitativo e transversal, com componente observacional aplicado, desenvolvido com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e a estabilidade de medição da termografia infravermelha como ferramenta quantitativa para detecção de assimetrias térmicas (ΔT) associadas à carga biomecânica ocupacional.

A investigação foi realizada em ambiente real de trabalho, durante a jornada laboral, seguindo um protocolo estritamente padronizado para aquisição e processamento de imagens térmicas. O foco central não foi a inferência diagnóstica clínica, mas a validação operacional do protocolo termográfico, incluindo: controle ambiental; padronização da emissividade; definição de Regiões de Interesse (ROI); cálculo do gradiente térmico contralateral (ΔT) e validação da estabilidade da medição em relação à sensibilidade instrumental.

Por se tratar de um estudo piloto metodológico, buscou-se examinar a aplicabilidade do (ΔT) como parâmetro quantitativo em um contexto ocupacional real, testando a consistência da medição térmica sob condições controladas.

2.2. Participante

Participou do estudo um trabalhador do sexo masculino, do setor metalúrgico, com 47 anos de idade e IMC de 24,5. Trata-se de um operador manual de esmerilhadeira, com dominância destra, que desempenha atividade caracterizada por esforço repetitivo, carga estática prolongada e exposição à vibração segmental de mãos e braços.

O participante realizava tarefas de lixamento para acabamento superficial de peças metálicas, envolvendo: sustentação de ferramenta motorizada com peso aproximado de 2,5 kg; abdução sustentada de ombro; componente de estabilização estática com o membro superior esquerdo; componente dinâmico predominante no membro superior direito; e exposição contínua à vibração mecânica.

Os seguintes critérios de exclusão pré-coleta foram adotados para controlar interferências termofisiológicas: ausência de atividade física intensa nas 24 horas anteriores; ausência de ingestão de cafeína, álcool ou estimulantes nas 6 horas anteriores; e não uso de pomadas, cremes ou terapias térmicas no dia da avaliação.

O participante encontrava-se em atividade laboral regular no momento da coleta e não apresentava diagnóstico formal de patologia osteomuscular aguda.

2.3. Instrumentação

As imagens térmicas foram adquiridas por meio de uma câmera termográfica FLIR C3 (FLIR Systems Inc., Wilsonville, OR, EUA), um dispositivo portátil de imagem infravermelha com sensibilidade térmica ≤ 0.05 °C (50 mK), adequado para detectar variações térmicas discretas em tecidos biológicos superficiais.

A câmera opera no espectro do infravermelho longo (7.5–14 μm), apropriado para a medição da radiação térmica emitida pela superfície da pele humana. O equipamento possui resolução térmica compatível com a análise de regiões anatômicas segmentares e permite a extração quantitativa de valores de temperatura mediante a definição de Regiões de Interesse (ROI).

Para o cálculo da temperatura radiante, a emissividade foi ajustada em 0.98, valor amplamente aceito para a pele humana, garantindo maior precisão na estimativa térmica. A distância entre o sensor e o participante foi padronizada em 1 metro, mantendo um ângulo de captura aproximadamente perpendicular ($\approx 90^\circ$) em relação à superfície corporal avaliada, a fim de minimizar erros associados à reflexão especular e variações angulares.

As imagens foram armazenadas em seu formato radiométrico original, possibilitando posterior análise quantitativa no software proprietário *FLIR Tools*® (FLIR Systems Inc.), utilizado para: definição de Regiões de Interesse (ROI); extração de temperaturas médias regionais; cálculo do gradiente térmico contralateral (ΔT); e comparação entre áreas anatômicas simétricas.

A escolha do equipamento considerou sua sensibilidade térmica compatível com a detecção de assimetrias inferiores a 0.5 °C, parâmetro relevante para a identificação de alterações térmicas associadas à carga biomecânica ocupacional.

2.4. Controle Ambiental

O controle ambiental foi conduzido de acordo com as diretrizes da *International Academy of Clinical Thermology* (IACT) para aquisição de imagens termográficas em seres humanos, visando garantir a estabilidade térmica cutânea e a padronização das condições de medição [16].

A coleta foi realizada em sala fechada, com temperatura ambiente controlada entre 20 °C e 22 °C. O monitoramento contínuo da temperatura e da umidade relativa do ar foi feito por meio de um termo-higrômetro digital com *data logger*, modelo *HOBO UX100-011A* (*Onset Computer Corporation, Bourne, MA, EUA*). O equipamento permitiu o registro contínuo das variáveis ambientais durante todo o período de aquisição das imagens térmicas.

A umidade relativa manteve-se abaixo de 60%, reduzindo a interferência das trocas térmicas convectivas e evaporativas que poderiam alterar a distribuição da temperatura cutânea.

Foram evitadas correntes de ar diretas, exposição à radiação solar e proximidade com fontes artificiais de calor, prevenindo interferências por reflexão térmica ou aquecimento localizado. A iluminação ambiente foi mantida estável e sem impacto térmico mensurável na área avaliada.

Antes da aquisição das imagens, o participante passou por um período de aclimação de 15 minutos no ambiente controlado, conforme recomendado por diretrizes internacionais, mantendo a região anatômica de interesse livre de roupas e adornos, permitindo a estabilização térmica superficial.

O rigoroso controle ambiental foi considerado essencial para assegurar que as assimetrias térmicas identificadas refletissem predominantemente respostas fisiológicas associadas à carga biomecânica ocupacional, preservando a validade interna do protocolo metodológico.

2.5. Protocolo de Aquisição de Dados

As imagens termográficas foram adquiridas durante a jornada de trabalho do participante, após a realização contínua da atividade de lixamento metálico, caracterizada por um componente dinâmico predominante no membro superior direito e um componente estático estabilizador no membro superior esquerdo.

Após o período de aclimação ambiental previamente descrito, o participante foi posicionado em ortostatismo, com o tronco ereto e os membros superiores relaxados ao longo do corpo, evitando contrações voluntárias que pudessem interferir na perfusão cutânea no momento da captura.

A região anatômica avaliada foi a cintura escapular, com foco bilateral nos ombros (membros superiores direito e esquerdo), por serem os segmentos mais exigidos biomecanicamente na atividade ocupacional analisada.

A câmera termográfica foi posicionada a 1 metro de distância do participante, em um ângulo aproximadamente perpendicular ($\approx 90^\circ$) à superfície corporal avaliada, segundo a padronização descrita na seção de instrumentação. Foram realizadas três capturas térmicas consecutivas, com intervalo de aproximadamente 30 segundos entre elas, mantendo as mesmas condições ambientais e posturais, a fim de avaliar a estabilidade da medição.

As imagens foram armazenadas em formato radiométrico e posteriormente analisadas para extração dos valores de temperatura média nas Regiões de Interesse (ROI) definidas bilateralmente sobre o músculo deltoide e a região do trapézio superior, correspondendo ao esforço funcional da tarefa.

O parâmetro primário de análise foi o Gradiente Térmico Contralateral (ΔT), calculado pela diferença entre a temperatura média do membro superior direito e a do membro superior esquerdo [17]:

$$\Delta T = T_{(direito)} - T_{(esquerdo)}$$

A escolha do ΔT como variável principal baseia-se na premissa de que indivíduos hígidos apresentam simetria térmica funcional, sendo que diferenças superiores a 0.3°C podem indicar alterações fisiológicas locais "...de acordo com critérios amplamente descritos na literatura termográfica". Assim, o protocolo buscou testar a aplicabilidade do ΔT como marcador quantitativo de assimetria térmica associada à carga biomecânica ocupacional.

Além da medição termográfica, a percepção subjetiva de dor foi registrada por meio da Escala Visual Analógica (EVA), aplicada imediatamente após a jornada de trabalho, permitindo uma correlação exploratória entre a assimetria térmica e os sintomas relatados.

O protocolo foi projetado com foco na padronização operacional, reprodutibilidade de medição e viabilidade de aplicação em contexto ocupacional real, caracterizando-se como etapa preliminar de validação metodológica para estudos com amostras ampliadas.

2.6. Processamento das Imagens Térmicas

As imagens termográficas foram analisadas no software *FLIR Tools®* (FLIR Systems Inc., Wilsonville, OR, EUA), permitindo a extração quantitativa dos dados radiométricos originais.

Para cada captura, foram definidas manualmente Regiões de Interesse (ROI) bilaterais, posicionadas simetricamente sobre a cintura escapular, focando nas áreas correspondentes ao músculo deltoide e à porção superior do trapézio, segmentos diretamente envolvidos na execução das atividades ocupacionais.

A delimitação das ROIs seguiu critérios de padronização anatômica e comparabilidade bilateral, incluindo: posicionamento equivalente entre os lados direito e esquerdo; área de medição similar em ambas as regiões; exclusão de bordas corporais ou áreas com potencial interferência de reflexão térmica; e manutenção da mesma referência anatômica nas três capturas consecutivas.

Para cada ROI, a temperatura média (°C) foi extraída e utilizada como parâmetro primário para análise comparativa. As três imagens obtidas foram processadas individualmente e, em seguida, calculou-se a média aritmética das temperaturas regionais para cada membro superior, visando reduzir a variabilidade pontual da medição.

A assimetria térmica foi determinada conforme descrito no item anterior, utilizando os valores médios consolidados das capturas. Adicionalmente, a variação entre as três medições consecutivas foi avaliada como forma de verificar a estabilidade da medição, considerando a sensibilidade térmica do equipamento previamente descrita como referência para análise da consistência instrumental.

Não foram aplicados filtros de suavização ou manipulações gráficas que alterassem os valores absolutos de temperatura, preservando a integridade dos dados radiométricos originais.

O processamento das imagens teve como finalidade priorizar a análise quantitativa objetiva, minimizando a interpretação visual subjetiva e reforçando o caráter metodológico do estudo piloto.

2.7. Abordagem Estatística

Considerando o delineamento como um estudo piloto metodológico com amostra única, a análise estatística foi descritiva e focada na avaliação da estabilidade da medição térmica e na consistência do gradiente de assimetria.

Para cada membro superior, foram calculados: média aritmética das três capturas consecutivas; desvio-padrão (DP); e coeficiente de variação (CV), expresso em porcentagem, para estimar a variabilidade relativa entre as medições.

A partir dos valores médios consolidados para cada lado, determinou-se o gradiente térmico contralateral médio (ΔT). O desvio-padrão do (ΔT), também foi calculado considerando as três capturas consecutivas, permitindo avaliar a estabilidade do diferencial térmico observado.

Com base na variabilidade das medições repetidas, estimou-se o intervalo de confiança de 95% das medições repetidas, exclusivamente para fins descritivos e de avaliação da consistência da medição, não sendo interpretado como inferência populacional.

A análise da estabilidade instrumental considerou a sensibilidade térmica da câmera previamente descrita como parâmetro de referência. Variações intraindividuais entre

capturas iguais ou inferiores ao erro instrumental foram interpretadas como indicativas de alta confiabilidade da medição. Diferenciais térmicos superiores ao erro instrumental foram considerados detectáveis pelo sistema, dentro dos limites técnicos do equipamento.

Adicionalmente, realizou-se uma análise exploratória da relação entre o valor médio de (ΔT), e o escore de dor obtido pela Escala Visual Analógica (EVA), para fins descritivos.

Não foram aplicados testes estatísticos inferenciais, dado que o objetivo principal foi testar a viabilidade metodológica, a estabilidade de medição e a detectabilidade do diferencial térmico em relação à sensibilidade do sensor, e não estabelecer generalizações estatísticas.

As análises foram conduzidas em ambiente computacional padrão para processamento de dados numéricos, garantindo a transparência e a reprodutibilidade do procedimento.

3 RESULTADOS

3.1. Estabilidade Térmica entre Capturas Repetidas

As temperaturas registradas para cada membro superior apresentaram baixa variação entre as medições repetidas. O desvio-padrão das três capturas foi reduzido em ambos os lados, e o coeficiente de variação manteve-se abaixo de 0.1%, indicando estabilidade intraindividual.

Os valores individuais das capturas, bem como a média, o desvio-padrão (DP), o coeficiente de variação (CV) e o intervalo de confiança de 95% (IC 95%) das medições repetidas, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Temperaturas registradas nas três capturas consecutivas (°C)

Capitura	Membro superior direito	Membro Superior esquerdo
1	33.42	32.86
2	33.47	32.91
3	33.44	32.88
Média	33.44	32.88
DP	0.025	0.025
CV (%)	0.07	0.08
IC 95%	33.38 – 33.50	32.82 – 32.94

O desvio-padrão reduzido e o coeficiente de variação inferior a 0.1% para ambos os membros superiores confirmam a baixa variabilidade intraindividual. Os intervalos de confiança estreitos das medições repetidas reforçam a precisão da estimativa da temperatura média sob as condições experimentais adotadas. Com base nas médias consolidadas, o gradiente térmico contralateral (ΔT) foi:

$$\Delta T = 0.56 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

O diferencial manteve-se consistente ao longo das capturas consecutivas, demonstrando a estabilidade do padrão térmico observado.

3.2. Gradiente Térmico Contralateral (ΔT)

Com base nas médias consolidadas das três capturas consecutivas, o gradiente térmico contralateral (ΔT) entre os membros superiores foi de 0.56 $^{\circ}\text{C}$. Esse diferencial térmico foi superior à sensibilidade instrumental previamente descrita, caracterizando uma assimetria térmica detectável pelo sistema de aquisição. A interpretação do valor observado foi realizada conforme critérios padronizados para classificação do gradiente térmico contralateral, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Critérios para interpretação do gradiente térmico (ΔT) e correlação com a gravidade clínico-ocupacional. Adaptado de [18,19].

ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	Classificação	Interpretação Clínico Ocupacional
≤ 0.30	Normal	Assimetria fisiológica
0.31 – 0.50	Alteração leve	Possível sobrecarga funcional inicial
0.51–0.80	Alteração leve a moderada	Evidência de sobrecarga musculoesquelética com potencial

ΔT (°C)	Classificação	Interpretação Clínico Ocupacional
> 0.80	Moderada/Importante	relevância clínica Alta probabilidade de comprometimento musculoesquelético

De acordo com esses critérios, o ΔT observado de 0.56 °C enquadra-se na faixa de **Alteração Leve a Moderada**, correspondendo a um diferencial térmico compatível com sobrecarga musculoesquelética de potencial relevância clínica.

A representação visual da assimetria térmica e a delimitação das regiões de interesse (ROIs) estão ilustradas na Figura 1.

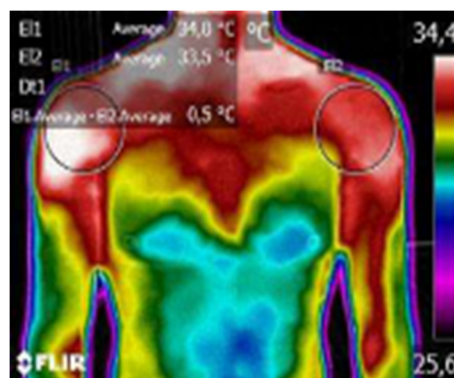


Figura 1. Imagem termográfica representativa obtida sob condições ambientais controladas, mostrando as regiões de interesse (ROIs) bilaterais delimitadas na cintura escapular.

Observou-se assimetria térmica entre os membros superiores, com maior temperatura média no lado direito. O gradiente térmico contralateral (ΔT), calculado a partir das médias consolidadas das três capturas consecutivas, foi de 0.56 °C.

3.3. Relação entre Assimetria Térmica e Escore de Dor

A percepção de dor foi avaliada por meio da Escala Visual Analógica (EVA), aplicada imediatamente após cada uma das três capturas termográficas consecutivas. Os valores registrados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores da percepção de dor (EVA) nas três medições consecutivas.

Medição	Membro Superior Direito	Membro Superior Esquerdo
1ª	6	2
2ª	6	2
3ª	6	2
Média	6.0	2.0
DP	0.0	0.0
IC 95%	6.0–6.0	2.0–2.0

Observou-se estabilidade absoluta dos escores de dor nas três medições consecutivas, sem variação intra-sujeito no intervalo de aquisição. A diferença interlateral média foi de 4 pontos na escala EVA, com maior intensidade de dor relatada no membro superior direito, lado previamente identificado com maior temperatura. Considerando o delineamento piloto com amostra única, a análise restringiu-se à estatística descritiva, não sendo aplicados testes inferenciais.

4 DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo metodológico demonstram a viabilidade técnica da termografia infravermelha (TIV) como ferramenta quantitativa complementar para a identificação de assimetrias térmicas associadas à sobrecarga musculoesquelética em contexto ocupacional. A estabilidade observada nas três capturas consecutivas, com coeficiente de variação inferior a 0.1%, evidencia alta consistência intrasessão do protocolo adotado. Achado este que reforça a importância do rigoroso controle ambiental e da padronização na aquisição das imagens, conforme recomendado pela literatura clássica e atualizada sobre o tema [19,14].

A confiabilidade da medição térmica depende diretamente da estabilidade do microclima, da aclimatação do indivíduo e da definição precisa das regiões de interesse (ROIs). O presente protocolo atendeu a esses requisitos ao manter a temperatura entre 20 °C - 22 °C e ajustar a emissividade para 0.98, parâmetros essenciais para a validade de avaliações termográficas humanas [20,19]. A baixa variabilidade intrasessão confirma que o gradiente térmico identificado reflete uma resposta fisiológica real, e não uma flutuação instrumental.

O gradiente térmico contralateral ($\Delta T = 0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$) excedeu significativamente a sensibilidade térmica do sensor ($\leq 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$). Na literatura, diferenciais bilaterais que ultrapassam a variabilidade técnica e a simetria fisiológica ($\Delta T > 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) são descritos como indicadores de alteração funcional e sobrecarga musculoesquelética [20,19]. De acordo com os critérios adotados na Tabela 2, o valor observado classifica-se como uma alteração leve a moderada, sugerindo relevância clínica e ocupacional no setor metalúrgico.

Observou-se correspondência lateral direta entre a maior temperatura no membro superior direito e o maior escore de dor relatado (EVA 6 vs. 2). A Escala Visual Analógica é um instrumento consolidado para mensuração da intensidade da dor [21], e sua estabilidade nas medições repetidas reforça a consistência da percepção do trabalhador. A convergência entre a variável instrumental (TIV) e a variável subjetiva (EVA) é fisiologicamente coerente, visto que processos inflamatórios e o aumento do metabolismo local elevam a perfusão sanguínea superficial e a radiação infravermelha detectável [22,23].

No contexto do lixamento — que envolve esforços repetitivos e vibração segmental —, a assimetria térmica pode refletir uma resposta adaptativa à carga biomecânica, mecanismo central no desenvolvimento de distúrbios osteomusculares [24,25]. Embora o delineamento piloto impeça inferências causais, a consistência entre o gradiente térmico e os sintomas sugere que a TIV atua como um biomarcador objetivo eficaz para o monitoramento ocupacional.

5 CONCLUSÃO

Este estudo piloto metodológico confirmou a viabilidade técnica e a estabilidade intrasessão de um protocolo padronizado de termografia infravermelha aplicado à avaliação da sobrecarga musculoesquelética em ambiente ocupacional real.

A baixa variabilidade entre as capturas consecutivas demonstrou consistência instrumental e adequação do controle ambiental adotado. O gradiente térmico contralateral identificado ($\Delta T = 0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$), superior à sensibilidade do equipamento,

caracterizou assimetria detectável, sendo classificado como leve a moderado segundo critérios clínico-ocupacionais.

A correspondência lateral entre maior temperatura cutânea e maior intensidade de dor relatada reforça a plausibilidade fisiológica da integração entre a medição objetiva e a sintomatologia subjetiva, embora sem inferência causal devido ao delineamento amostral.

Os resultados sustentam a aplicabilidade do protocolo como base metodológica para investigações futuras com amostras ampliadas, incluindo análises inferenciais e seguimento longitudinal. A padronização aqui proposta contribui para fortalecer a qualidade metodológica das pesquisas que utilizam termografia infravermelha na saúde ocupacional e osteomuscular.

Agradecimentos: Os autores agradecem o apoio concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil, que financiou parcialmente este estudo por meio de bolsas de estudo (Código de Financiamento 001).

Conflitos de Interesse: Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

6 REFERÊNCIAS

1. Blandino, G. How to measure stress in smart and intelligent manufacturing systems: a systematic review. *Systems* **2023**, *11*, 167. <https://doi.org/10.3390/systems11040167>
2. Hijry, H.; Naqvi, S.M.R.; Javed, K.; Albalawi, O.H.; Olawoyin, R.; Varnier, C.; Zerhouni, N. Real time worker stress prediction in a smart factory assembly line. *IEEE Access* **2024**, *12*, 116238–116249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3446875>
3. Castro, V.R.; Fonseca, M.C.R.; Martins, L.V. Individual factors are associated with musculoskeletal pain and discomfort in workers from a beverage company. *Fisioter. Pesqui.* **2025**, *32*, e23011524en. <https://doi.org/10.1590/1809-2950/e23011524en>
4. Frutuoso, J.T.; Cruz, R.M. Mensuração da carga de trabalho e sua relação com a saúde do trabalhador. *Rev. Bras. Med. Trab.* **2005**, *3*, 29–36.
5. Spellmeier, J.P.; Kuntz, L.Z.; Rosa, C.B.; Valentim, A.M.; Baldessarelli, G.M.; Rediske, G. Desafios na implementação da Indústria 4.0 no setor metalmeccânico brasileiro: análise de barreiras de entrada. *Rev. Prod. Online* **2025**, *25*, 5436. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v25i2.5436>

6. Sousa, A.R.F.; Rodolpho, D. A importância da segurança do trabalho na produção industrial. *Rev. Interface Tecnol.* **2020**, *17*, 817–824. <https://doi.org/10.31510/inf.v17i2.1008>
7. Machado, T.S.S.; Leal, P.H.A.C.; Cardoso, T.A.S.; Borges, L.S.; Santos, C.J.M.; Sant'Anna, A.M.O. Avaliação de risco e segurança no processo de fundição na indústria metalúrgica. *Rev. Prod. Online* **2024**, *23*, 5104. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v23i3.5104>
8. Silva, J.S., Jr.; Buzzoni, G.P.; Morrone, L.C. Worker's musculoskeletal complaints and biomechanical work conditions in an aluminium smelter. *Rev. Bras. Med. Trab.* **2016**, *14**, 115–120. <https://doi.org/10.5327/Z1679-443520160215>
9. Manoel, A.V.; Cavalcante, D.F.B. Benefícios concedidos e gastos previdenciários por distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho, Brasil, 2008–2018. *Cad. Saude Colet.* **2025**, *33*, e33040384. <https://doi.org/10.1590/1414-462X202533040384>
10. Skovlund, S.V.; Bláfoss, R.; Sundstrup, E.; Andersen, L.L. Association between physical work demands and work ability in workers with musculoskeletal pain: cross-sectional study. *BMC Musculoskelet. Disord.* **2020**, *21*, 166. <https://doi.org/10.1186/s12891-020-03191-8>
11. Raja, S.N.; Carr, D.B.; Cohen, M.; Finnerup, N.B.; Flor, H.; Gibson, S.; et al. The revised International Association for the Study of Pain definition of pain: concepts, challenges, and compromises. *Pain* **2020**, *161*, 1976–1982. <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000001939>
12. Soares, A.L.; Xavier, A.A.P.; Michaloski, A.O. Occupational risk evaluation through infrared thermography: development and proposal of a rapid screening tool for risk assessment arising from repetitive actions of the upper limbs. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 3390. <https://doi.org/10.3390/ijerph17103390>
13. Silva, L.A.; Albuquerque, M.C.O.; Viana, J.S.; Melo, N.O.A.; Oliveira, P.V.S. A importância da fisioterapia na saúde do trabalhador: revisão de literatura. *Fisioterapia* **2025**, *29*, 151. <https://doi.org/10.69849/revistaft/cl10202510101125>
14. Lima, R.P.S.; Brioschi, M.L.; Teixeira, M.J.; Neves, E.B. Análise termográfica de corpo inteiro: indicações para investigação de dores crônicas e diagnóstico complementar de disfunções secundárias. *Pan Am. J. Med. Thermol.* **2015**, *2*, 70–77. <https://doi.org/10.18073/2358-4696/pajmt.v2n2p70-77>
15. Nobre, T.L.; Caperuto, E.C. Termografia infravermelha: integrando ciência e tecnologia no treinamento desportivo para reduzir lesões. *Fisioter. Bras.* **2024**, *25*, 1645–1647. <https://doi.org/10.62827/fb.v25i5.1029>
16. International Academy of Clinical Thermology (IACT). Standards and Protocols in Clinical Thermographic Imaging. **2002**. Available online: <https://www.iact-org.org/professionals/thermog-guidelines.html> (accessed on 10 March 2026).
17. Morales-Cervantes, A.; Guevara, E.; González, F.J.; Chávez-Campos, G.M.; Vergara-Hernández, H.J.; Núñez-Leyva, J.M.; Ortiz-Dosal, A.; Kolosovas-Machuca, E.S. Determination of distal temperature using infrared thermography in Mexican children with diabetes. *Quant. Infrared Thermogr. J.* **2024**, *21*, 320–334. <https://doi.org/10.1080/17686733.2023.2236856>
18. Brioschi, M.L.; Mejia, D.P.M.; Sardá Júnior, J.J.; Ruiz, R.C. *Termografia Médica: Bases e Princípios*; Editora Andreoli: São Paulo, Brazil, **2015**.
19. Ring, E.F.J.; Ammer, K. Infrared thermal imaging in medicine. *Physiol. Meas.* **2012**, *33*, R33–R46. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/33/3/R33>

20. Fracasso, B.V.; Castro, R.B.; Brioschi, M.L.; Malysz, T. Exploring facial thermography patterns in women with chronic migraine. *J. Clin. Med.* **2023**, *12*, 7458. <https://doi.org/10.3390/jcm12237458>
21. Karcioğlu, O.; Topacoglu, H.; Dikme, O.; Dikme, O. A systematic review of the pain scales in adults: which to use? *Am. J. Emerg. Med.* **2018**, *36*, 707–714. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2018.01.008>
22. Vitorino, C.F.; Silva, N.C.O.V.; Alfieri, F.M. Use of algometry and infrared thermography as pain assessment tools: a systematic review. *Acta Fisiatr.* **2023**, *30*, 129–135. <https://doi.org/10.11606/issn.2317-0190.v30i2a178238>
23. Kesztyüs, D.; Brucher, S.; Wilson, C.; Kesztyüs, T. Use of infrared thermography in medical diagnosis, screening, and disease monitoring: a scoping review. *Medicina (Kaunas)* **2023**, *59*, 2139. <https://doi.org/10.3390/medicina59122139>
24. Seixas, A.; Mendes, J.; Vardasca, R.; Bernardo-Filho, M.; Rodrigues, S. Immediate effects of whole-body vibration exercise on thermal symmetry of the lower legs and ankles. *Rev. Hosp. Univ. Pedro Ernesto* **2018**, *17*, 22–29. <https://doi.org/10.12957/rhupe.2018.39272>
25. Martins, A.B.; Brioschi, M.L.; Rodrigues, C.K.; Lopes, E.D.S. Using infrared thermography to assess musculoskeletal overload in the hands of harvester operators. *Forests* **2025**, *16*, 429. <https://doi.org/10.3390/f16030429>