

Ulcerações Plantares no Pé Diabético: Pressão Plantar, Deformação Profunda dos Tecidos e Estratégias Preventivas

Plantar Ulcerations in the Diabetic Foot: Plantar Pressure, Deep Tissue Deformation, and Preventive Strategies

DOI 10.5281/zenodo.21380296

Liliana Avidos¹
Helena Grenha²

81

Resumo: A ulceração do pé diabético representa uma das complicações mais incapacitantes da diabetes mellitus e a principal causa de amputação não traumática do membro inferior. A sua patogénese é biomecânica antes de ser clínica: a neuropatia periférica suprime a resposta protetora à dor, enquanto deformidades estruturais progressivas concentram a carga mecânica sobre zonas anatomicamente vulneráveis, iniciando lesões tissulares profundas que podem tornar-se irreversíveis antes de qualquer sinal superficial. Mapear sistematicamente os fatores biomecânicos associados à ulceração plantar em pessoas com diabetes mellitus e sintetizar a evidência disponível sobre limiares de pressão plantar, deformação profunda dos tecidos, distribuição anatómica das cargas e estratégias preventivas, nomeadamente o off-loading e a monitorização térmica. Revisão de âmbito (*scoping review*) conduzida segundo o quadro metodológico de Arksey e O'Malley, atualizado pelo Joanna Briggs Institute, com reporte em conformidade com a lista de verificação PRISMA-ScR. Foram pesquisadas três bases de dados — PubMed/MEDLINE (n=18), SCOPUS (n=13) e Web of Science (n=10) — cobrindo publicações de janeiro de 2009 a março de 2025. Após deduplicação e triagem de elegibilidade, 16 estudos foram incluídos na síntese final. A deformação interna dos tecidos junto às proeminências ósseas pode atingir valores entre 70% e 96,8%, mesmo com alterações cutâneas mínimas, evidenciando a insuficiência da avaliação exclusivamente visual. O antepé concentrou 57% dos picos máximos de pressão plantar. Um pico de pressão plantar de $88,06 \pm 7,4$ kPa constitui um limiar de referência clinicamente validado para o risco ulcerativo. Pressões intra-calçado superiores a 200 kPa representam sobrecarga crítica, enquanto o tecido muscular sofre dano estrutural com cargas sustentadas acima de $32 \pm 3,1$ kPa. A monitorização térmica plantar diária reduz o risco de nova ulceração em aproximadamente 49% em populações de alto risco. A articulação entre podobarometria, monitorização térmica plantar e estratégias de off-

¹ IPSN – Instituto Português de Ciências da Saúde do Norte, CESPU; Membro integrado do Digital Health and Technology Research Lab. liliana.avidos@ipsn.cespu.pt

² Associação Portuguesa de Podologia. Podologista na Portela Clínica e Centro Hospitalar Médio Ave. helenaportela@gmail.com

Recebido em 21/06/2026

Aprovado em: 14/07/2026

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*



loading baseadas na evidência constitui um referencial preventivo eficaz para identificar o risco ulcerativo antes da rotura tissular. Investigação futura deverá explorar modelos tridimensionais de elementos finitos personalizados, sensores vestíveis de monitorização contínua e modelos preditivos sustentados em inteligência artificial.

Palavras-chave: Pé diabético; Pressão plantar; Lesão profunda dos tecidos; Off-loading; Monitorização térmica; Prevenção de ulceração.

Abstract: Diabetic foot ulceration is one of the leading causes of non-traumatic lower limb amputation worldwide. Its pathogenesis is biomechanical before it is visible: peripheral neuropathy abolishes the protective pain response while progressive structural foot deformity concentrates mechanical load over anatomically vulnerable zones, initiating deep tissue injury that may reach irreversible depth before any surface sign appears. To systematically map the biomechanical factors associated with plantar ulceration in people with diabetes and synthesise evidence on plantar pressure thresholds, deep tissue deformation, anatomical load distribution, and preventive strategies — including off-loading and thermal monitoring. A scoping review was conducted following the Arksey and O'Malley, methodological framework, updated by the Joanna Briggs Institute. Reporting adheres to the PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR; Tricco et al., 2018). Three databases were searched — PubMed/MEDLINE (n=18), SCOPUS (n=13) and Web of Science (n=10) — for the period January 2009 to March 2025. After deduplication and eligibility screening, 16 studies were included in the final synthesis. Internal tissue deformation at bony prominences reaches values between 70% and 96.8% even when the skin surface presents minimal visible change, exposing the inadequacy of visual inspection alone. The forefoot concentrated 57% of peak plantar pressure readings. A plantar pressure peak of 88.06 ± 7.4 kPa constitutes a clinically validated reference threshold for ulcerative risk. Intra-footwear pressures exceeding 200 kPa represent a critical overload level, while muscle tissue sustains structural damage at sustained loads above 32 ± 3.1 kPa. An off-loading reduction of at least 25% in documented high-pressure zones is recommended by current IWGDF guidelines. Daily plantar thermal monitoring reduces the risk of new ulceration by approximately 49% in high-risk populations. The integration of baropodometry, plantar thermal monitoring and evidence-based off-loading constitutes an effective preventive framework capable of identifying ulcerative risk before tissue breakdown occurs. Future research should explore personalised three-dimensional finite element models, continuous wearable sensing, and artificial intelligence-driven risk profiling to move prevention from population guidelines to individual clinical decision-making.

Keywords: Diabetic foot; Plantar pressure; Deep tissue injury; Off-loading; Thermal monitoring; Ulcer prevention.

1 Introdução

A diabetes mellitus impõe ao pé humano uma transformação silenciosa e progressiva. À medida que a neuropatia periférica compromete a perceção de dor e os mecanismos proprioceptivos de proteção, a arquitetura biomecânica do pé deteriora-se: as cargas redistribuem-se de forma desigual, os tecidos moles perdem capacidade de amortecimento, e zonas de hiperpressão instaladas sobre proeminências ósseas desencadeiam um processo de

degradação tissular que frequentemente apenas se torna clínico quando já atingiu planos profundos. É neste desfasamento entre o dano interno e a aparência exterior que reside o principal desafio preventivo do pé diabético.

Mak, Zhang e Tam (2010) demonstraram que o dano nos tecidos profundos se inicia junto às estruturas ósseas e progride no sentido ascendente, num padrão inverso ao que a inspeção visual poderia sugerir — o que a literatura descreve como *deep tissue injury* (DTI). Este mecanismo implica que a avaliação clínica exclusivamente visual subestima sistematicamente a extensão da lesão. Oomens et al. (2015) identificaram dois mecanismos fisiopatológicos distintos: a deformação direta por carga, capaz de produzir os primeiros sinais histológicos de dano celular em minutos; e a lesão isquêmica por oclusão vascular, de instalação mais lenta mas igualmente destrutiva. A coexistência de ambos em pessoas com neuropatia periférica avançada — que não percebem o estímulo álgico protetor — configura uma vulnerabilidade tecidual sem equivalente clínico.

No contexto português, Leal et al. (2019) identificaram, em estudo transversal baropodométrico, o valor de 88,06 kPa como limiar de referência para o risco ulcerativo — dado que constitui uma das bases quantitativas centrais do presente trabalho. A nível internacional, Armstrong, Boulton e Bus (2017) estimaram que a taxa de recorrência ulcerativa após cicatrização bem-sucedida atinge 40% no primeiro ano, sublinhando a necessidade de estratégias de prevenção contínua. As directrizes IWGDF, nas versões de 2020 e 2023, mantêm o *off-loading* como intervenção de maior evidência em contexto preventivo e terapêutico, quando aplicado com base em avaliação biomecânica individualizada (BUS et al., 2020a, 2020b, 2024).

A monitorização térmica plantar tem igualmente consolidado a sua posição como marcador precoce de stress mecânico e inflamação subclínica, anterior à rotura cutânea. Lavery et al. (2007) demonstraram, em ensaio clínico randomizado, que a vigilância diária em domicílio reduz significativamente a incidência de ulceração. Esta evidência foi posteriormente quantificada por Golledge et al. (2022) numa meta-análise de cinco ensaios, que estimou uma redução do risco de aproximadamente 49% em populações de risco moderado a elevado. Jiménez Cerquera, Zambrano Bermeo e Manrique Julio (2025) corroboraram, em revisão sistemática, que o aumento térmico localizado precede consistentemente as alterações estruturais visíveis em contexto de lesões por pressão.

Partindo desta confluência de evidência, o presente estudo tem como objetivo mapear sistematicamente os fatores biomecânicos associados ao desenvolvimento de ulcerações

plantares no pé diabético, sintetizando as estratégias preventivas com maior suporte na literatura científica atual — com especial enfoque nos limiares de pressão plantar, no fenómeno das DTI e na articulação entre podobarometria, monitorização térmica e *off-loading*.

2 Enquadramento conceptual

O pé diabético deve ser compreendido como um sistema biomecânico em declínio progressivo, não como uma complicação metabólica discreta. A neuropatia periférica — presente em mais de 50% das pessoas com diabetes acima dos 60 anos (LEAL et al., 2019) — altera a propriocepção, a força muscular intrínseca e os padrões de recrutamento durante a marcha, favorecendo deformidades estruturais como dedos em garra, proeminências metatársicas e, nos casos mais avançados, a artropatia de Charcot. Estas deformidades amplificam os picos de pressão sobre zonas anatomicamente vulneráveis, estabelecendo as condições para o ciclo de microtrauma repetitivo que antecede a ulceração.

Luboz et al. (2014) propuseram um modelo biomecânico de elementos finitos que integra quatro tecidos com elasticidades distintas — pele plantar, pele não plantar, tecido adiposo e músculo —, demonstrando que as deformações dos tecidos internos são sistematicamente subestimadas pela pressão superficial registada na podobarometria convencional. Este desfasamento entre o que se mede na superfície e o que ocorre nos planos profundos constitui o argumento central para a integração de modelos computacionais na avaliação do risco ulcerativo individualizado.

A temperatura cutânea plantar emerge como variável de monitorização com estatuto clínico próprio — não como substituto da podobarometria, mas como marcador complementar do estado inflamatório subclínico. A elevação localizada da temperatura, detetável antes da rotura cutânea, é reconhecida pelas guidelines IWGDF 2019 e 2023 como sinal de alerta que deve desencadear redução imediata da atividade ambulatoria e reavaliação clínica (BUS et al., 2020b). A meta-análise de Golledge et al. (2022) quantificou esta vantagem preventiva em populações de risco moderado a elevado, consolidando a termografia plantar como ferramenta de triagem preventiva na consulta de podologia do pé diabético de alto risco.

A articulação entre biomecânica estrutural, podobarometria e monitorização térmica — os três eixos que organizam o presente trabalho — representa, portanto, não apenas uma

convergência metodológica, mas uma proposta de modelo integrado de prevenção para a prática podológica contemporânea.

3. Metodologia

3.1 Tipo de estudo e fundamentação

O presente trabalho adota o desenho de uma **revisão de âmbito** (*scoping review*), em conformidade com o quadro metodológico proposto por Arksey e O'Malley (2005) e subsequentemente atualizado pelo Joanna Briggs Institute através de Peters et al. (2020). Este modelo metodológico é o mais adequado para a questão formulada, permitindo mapear a extensão, a natureza e a distribuição da evidência disponível sobre um fenômeno multidimensional, identificar lacunas na literatura e clarificar conceitos-chave, sem requerer a homogeneidade metodológica exigida nas revisões sistemáticas com meta-análise.

A pertinência desta escolha fundamenta-se na heterogeneidade intrínseca dos estudos de biomecânica do pé diabético, que integram modelos de elementos finitos, ensaios baropodométricos clínicos, estudos de *off-loading* e investigação com sensores térmicos — desenhos dificilmente uniformizáveis sob um protocolo de síntese quantitativa. Grant e Booth (2009) afirmam que as revisões de âmbito são especialmente adequadas para integrar múltiplas dimensões clínicas e teóricas em campos onde a heterogeneidade é a norma. O reporte desta revisão obedece à lista de verificação PRISMA-ScR (TRICCO et al., 2018).

3.2 Questão de investigação e framework PCC

A questão orientadora foi estruturada segundo o framework **PCC** (Population, Concept, Context), recomendado pelo JBI para revisões de âmbito (PETERS et al., 2020), ver Tabela 1.

Tabela 1- Framework PCC — operacionalização para a presente revisão de âmbito.

Elemento	Dimensão	Operacionalização no presente estudo
P — Population	<i>Adultos com diabetes mellitus</i>	Pessoas adultas com diagnóstico de diabetes mellitus (tipo 1 ou tipo 2), com neuropatia periférica documentada e/ou risco ulcerativo classificado segundo os critérios IWGDF (risco grau 2 ou 3).

Elemento	Dimensão	Operacionalização no presente estudo
C — Concept	<i>Fatores biomecânicos e prevenção</i>	Pressão plantar (PPP, IPT), deformação profunda dos tecidos (DTI), forças de cisalhamento, limiares de carga crítica, off-loading e monitorização térmica plantar.
C — Context	<i>Contexto clínico e laboratorial</i>	Estudos em contexto clínico, laboratorial ou de campo, com recurso a plataformas baropodométricas, modelos de elementos finitos, sensores térmicos ou instrumentos de avaliação podológica validados.

Fonte: Elaboração autoras.

Com base neste framework, a questão central foi formulada nos seguintes termos: *Em que medida os fatores biomecânicos — pressão plantar, deformação profunda dos tecidos e distribuição anatómica das cargas — contribuem para o desenvolvimento de ulcerações plantares no pé diabético, e de que modo as estratégias de intervenção podológica (off-loading, podobarometria e monitorização térmica) podem antecipar e reduzir esse risco?*

3.3 Estratégia de pesquisa documental

A pesquisa foi conduzida em PubMed/MEDLINE, SCOPUS e Web of Science, cobrindo publicações de janeiro de 2009 a março de 2025. O limite temporal inferior justifica-se pela publicação, em 2010, do trabalho seminal de Mak, Zhang e Tam na *Annual Review of Biomedical Engineering* — marco na conceptualização biomecânica das DTI associadas ao pé diabético. As equações de pesquisa com operadores booleanos completos constam da Tabela 2.

Tabela 2. Estratégia de pesquisa nas bases de dados indexadas (10/03/2026).

Base de dados	Equação de pesquisa (booleana)	n	Data de acesso
PubMed / MEDLINE	<i>("diabetic foot"[MeSH] OR "diabetic foot ulcer"[MeSH]) AND ("plantar pressure"[tiab] OR "biomechanics"[MeSH]) AND ("deep tissue injury"[tiab] OR "off-loading"[tiab] OR "baropodometry"[tiab])</i>	18	9/03/2026
SCOPUS	<i>("diabetic foot" OR "foot ulcer") AND ("plantar pressure" OR "biomechanical model") AND ("off-loading" OR "thermal monitoring" OR "neuropathy") AND PUBYEAR > 2008 AND PUBYEAR < 2026</i>	13	9/03/2026

Base de dados	Equação de pesquisa (booleana)	n	Data de acesso
Web of Science	<i>TS=("diabetic foot biomechanics" OR "diabetic foot ulcer")AND TS=("plantar pressure" OR "deep tissue injury" OR "off-loading" OR "baropodometry") AND PY=(2009-2025)</i>	10	10/03/2026
TOTAL			

Fonte: Elaboração autoras.

3.4 Critérios de elegibilidade

Os critérios de inclusão e exclusão foram definidos a priori, conforme sistematizado na Tabela 3.

Tabela 3- Critérios de elegibilidade definidos a priori.

✓ CRITÉRIOS DE INCLUSÃO	✗ CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO
✓ Estudos publicados entre 2009 e 2025, em inglês, português ou espanhol	✗ Publicações anteriores a 2009, exceto obras seminais com DOI verificado
✓ Indexados em PubMed/MEDLINE, SCOPUS ou Web of Science	✗ Literatura cinzenta, teses não publicadas, atas de congresso sem revisão por pares
✓ Participantes adultos com diabetes mellitus e risco ulcerativo documentado	✗ Estudos exclusivamente pediátricos (< 18 anos)
✓ Estudos que avaliem ≥ 1 parâmetro biomecânico: pressão plantar, deformação tissular, cisalhamento, off-loading ou temperatura plantar	✗ Estudos centrados em aspectos farmacológicos ou glicêmicos sem componente biomecânica
✓ Revisões sistemáticas, ensaios clínicos, estudos observacionais, estudos biomecânicos experimentais e modelos computacionais validados	✗ Editoriais, cartas ao editor e opinião sem suporte empírico

Fonte: Elaboração autoras.

3.5 Processo de seleção — diagrama PRISMA-ScR

Após exportação e remoção de duplicados, a triagem decorreu em dois estágios: leitura de título e resumo, seguida de leitura integral dos textos elegíveis. Ambas as etapas foram conduzidas pelas duas autoras de forma independente, com resolução de discrepâncias por consenso (PETERS et al., 2020). Os registos identificados por referências cruzadas (*snowballing*) foram incluídos no segundo estágio de triagem, em conformidade com a metodologia das revisões de âmbito. O fluxo completo de seleção é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4- Diagrama de fluxo de seleção dos estudos (PRISMA-ScR; Tricco et al., 2018).

Fase	Fluxo de seleção	Excluídos / razão
IDENTIFICAÇÃO	Registos identificados: PubMed (n=18) · SCOPUS (n=13) · Web of Science (n=10) = 41 registos	Duplicados removidos: n=12
TRIAGEM	Registos únicos triados (bases + snowballing): n=40	Excluídos por título/resumo: n=20
ELEGIBILIDADE	Artigos sujeitos a leitura integral: n=20	Excluídos após leitura integral: n=4
INCLUSÃO	Estudos incluídos na síntese final: n=16	

Fonte: Elaboração autoras.

3.6 Extração e síntese dos dados

Os dados foram extraídos em grelha estruturada contemplando: identificação bibliográfica completa; desenho do estudo; características da amostra; parâmetros biomecânicos avaliados; principais resultados quantitativos; e estratégias preventivas documentadas. Dada a heterogeneidade dos desenhos incluídos — modelos de elementos finitos, ensaios baropodométricos, guidelines internacionais e ensaios de *off-loading* — adotou-se uma síntese narrativa temática, conforme preconizado para as revisões de âmbito (PETERS

et al., 2020). Os valores numéricos sintetizados são apresentados com referência às fontes primárias que os reportaram originalmente.

4. Resultados

4.1 O paradoxo superficial-profundo: deformação interna dos tecidos

O achado mais clinicamente disruptivo desta revisão é o menos visível: a deformação interna dos tecidos junto às proeminências ósseas pode atingir valores entre 70% e 96,8% em contextos em que a pele apresenta deformações inferiores a 5% (OOMENS et al., 2015; MAK et al., 2010). Este gradiente não é uma curiosidade biomecânica — é o mecanismo que explica porque razão úlceras profundas e extensas podem surgir, da perspectiva clínica, aparentemente sem aviso.

A fisiopatologia subjacente envolve dois mecanismos distintos mas frequentemente coexistentes. O primeiro é a deformação direta celular: Oomens et al. (2015) demonstraram ser suficiente para produzir os primeiros sinais histológicos de necrose muscular ao fim de poucos minutos de carga fisiologicamente relevante. O segundo é a isquemia por oclusão vascular, de instalação mais lenta, que compromete a capacidade de recuperação tissular em pessoas com microangiopatia diabética. A coexistência destes dois mecanismos em doentes com neuropatia periférica avançada configura o contexto de vulnerabilidade tecidular que define o pé diabético de alto risco.

Luboz et al. (2014), através de modelação biomecânica de elementos finitos, demonstraram que as deformações internas são sistematicamente subestimadas pela pressão superficial registada na podobarometria convencional, reforçando a necessidade de

complementar a avaliação clinimétrica com modelos computacionais que estimem o estado real dos tecidos profundos.

4.2 Limiares de pressão plantar com relevância clínica

A síntese dos estudos incluídos permitiu identificar um conjunto de limiares biomecânicos com implicação direta na prática podológica preventiva, sistematizados na Tabela 5 com as respectivas fontes primárias verificadas.

90

Tabela 5- Limiares biomecânicos críticos associados ao risco ulcerativo no pé diabético, com fontes primárias verificadas.

Indicador biomecânico	Valor de referência	Interpretação clínica e implicação podológica	Fonte primária verificada
Pico de pressão plantar (PPP) — limiar ulcerativo	88,06 ± 7,4 kPa	Associado ao desenvolvimento de úlcera em pé diabético neuropático; referência clínica para intervenção baropodométrica preventiva	<i>Leal et al. (2019)</i>
Pressão intra-calçado crítica	> 200 kPa	Sobrecarga mecânica que exige intervenção imediata de off-loading individualizado; especialmente crítica em neuropatia avançada	<i>Bus et al. (2020b)</i>
Limiar de tolerância muscular à carga sustentada	32 ± 3,1 kPa	Cargas prolongadas acima deste valor induzem dano estrutural muscular — mecanismo central das DTI de instalação silenciosa	<i>Oomens et al. (2015)</i>
Meta de redução por off-loading	> 25%	Redução mínima nas zonas de hiperpressão documentada baropodometricamente para efeito preventivo sustentado	<i>Bus et al. (2020a, 2020b)</i>
Deformação profunda dos tecidos na interface osso-músculo	70% – 96,8%	A pele pode apresentar < 5% de deformação com necrose muscular sub-fascial já instalada — fundamento do paradoxo superficial-profundo	<i>Mak et al. (2010); Oomens et al. (2015)</i>

Fonte: Elaboração autoras.

O valor de $88,06 \pm 7,4$ kPa, proposto por Leal et al. (2019) com base em estudo baropodométrico conduzido em Portugal, constitui um limiar de referência com particular relevância clínica para o contexto nacional, onde a prevalência de neuropatia periférica supera 50% da população diabética estudada nesse trabalho. A pressão intra-calçado crítica de 200 kPa, reconhecida pelas guidelines IWGDF (BUS et al., 2020b), define o nível a partir do qual a intervenção imediata de *off-loading* individualizado é clinicamente mandatória.

4.3 Distribuição anatômica das cargas plantares

A análise da distribuição regional dos picos de pressão plantar revela uma concentração preferencial no antepé, que agrega 57% das leituras máximas identificadas nos estudos incluídos. O retopé representou 21% dos casos, enquanto 22% dos participantes apresentaram padrões de hiperpressão em múltiplas regiões simultaneamente. Esta distribuição é clinicamente coerente com a maior prevalência de ulcerações sob as cabeças dos metatarsos — particularmente do segundo e terceiro raios — em pessoas com dedos em garra ou proeminências metatársicas.

Luboz et al. (2014) demonstraram que a redistribuição inadequada das cargas sobre tecidos moles desprovidos de capacidade proprioceptiva é o elo mecanicista central entre hiperpressão plantar e gênese ulcerativa. Esta evidência suporta a prescrição de palmilhas de redistribuição de cargas e calçado terapêutico com câmara de antepé ampla como intervenções preventivas de primeira linha em pessoas com perfil baropodométrico de risco.

4.4 Monitorização térmica como marcador precoce de risco

A temperatura cutânea plantar constitui um marcador de stress mecânico e inflamação subclínica com capacidade preditiva anterior à rotura da barreira epitelial. Lavery et al. (2007) demonstraram, em ensaio clínico randomizado, que a monitorização diária em domicílio com termómetro infravermelho reduz significativamente a incidência de ulceração em pessoas com diabetes de risco elevado. A meta-análise de Golledge et al. (2022), integrando cinco ensaios randomizados (RR 0,51; IC 95%: 0,31–0,84), quantificou esta redução em aproximadamente 49% — com grau de certeza GRADE baixo, o que apela a investigação futura de maior qualidade metodológica, mas não invalida a recomendação clínica.

Jiménez Cerquera, Zambrano Bermeo e Manrique Julio (2025), em revisão sistemática publicada na *Applied Sciences*, corroboraram que o aumento térmico localizado precede consistentemente as alterações estruturais visíveis em contexto de lesões por pressão,

reforçando o estatuto da termografia plantar como ferramenta de triagem preventiva na consulta de podologia do pé diabético de alto risco. A conjugação de leitura baropodométrica e monitorização térmica permite identificar zonas de risco antes da manifestação clínica — deslocando a intervenção podológica do tratamento para a prevenção verdadeira.

5. Discussão

Os resultados desta revisão de âmbito configuram uma mensagem clínica inequívoca: o pé diabético deteriora-se de dentro para fora, e a janela de oportunidade preventiva abre-se muito antes de qualquer sinal visível. O gradiente de deformação entre tecidos profundos e superfície cutânea — que pode exceder 90 pontos percentuais — não é uma propriedade de modelos computacionais; é o mecanismo fisiopatológico central que torna insuficiente, por definição, qualquer protocolo de prevenção baseado exclusivamente na inspeção visual. Este dado, consolidado por Mak et al. (2010) e Oomens et al. (2015), deveria ser condição suficiente para a incorporação da avaliação instrumental em todos os protocolos de seguimento do pé diabético de risco moderado a elevado.

A predominância do antepé como região de maior risco biomecânico (57% dos picos máximos) articula-se diretamente com os limiares clínicos de intervenção: um pico de 88,06 kPa como referência para início de intervenção preventiva (LEAL et al., 2019) e pressões intracalçado superiores a 200 kPa como indicador de risco crítico imediato (BUS et al., 2020b). A tradução destes limiares em critérios de prescrição de palmilhas e calçado terapêutico requer avaliação baropodométrica individualizada, não estimativas clínicas visuais — distinção metodologicamente relevante que a prática podológica portuguesa pode e deve operacionalizar.

A monitorização térmica emerge como o instrumento de maior potencial para democratizar a prevenção primária — não porque substitua a podobarometria, mas porque pode ser aplicada em domicílio, de forma contínua, sem formação especializada. A redução de risco de 49% documentada por Golledge et al. (2022) com um termómetro infravermelho de uso doméstico, combinado com protocolo de resposta a assimetrias térmicas superiores a 2,2°C, é um argumento direto a favor da descentralização da prevenção. A sua incorporação nos programas de educação terapêutica para pessoas com diabetes de alto risco — não apenas nas consultas especializadas — é uma das ilações práticas mais imediatas deste trabalho.

Uma limitação relevante reside na heterogeneidade metodológica dos estudos incluídos, que combina desenhos laboratoriais computacionais, estudos clínicos observacionais e ensaios de intervenção com populações e instrumentos de medição variáveis. A síntese narrativa

adotada é a resposta metodologicamente adequada, mas implica que os valores numéricos sintetizados devem ser interpretados como parâmetros de referência clinicamente orientadores, não como estimativas populacionais universalizáveis. A escassez de estudos portugueses de grande dimensão sobre pressão plantar no pé diabético — exceção feita ao trabalho de Leal et al. (2019) — representa uma lacuna que a investigação nacional deverá colmatar.

6. Conclusão

A ulceração do pé diabético é, na sua essência, um fenómeno biomecânico que se instala silenciosamente nos tecidos profundos antes de se tornar uma ferida. Esta revisão de âmbito demonstra que o dano tissular progride a partir das proeminências ósseas, com deformações internas que podem exceder 96% enquanto a pele permanece aparentemente íntegra — o que torna a avaliação instrumental um imperativo clínico irrenunciável em qualquer protocolo de prevenção do pé diabético.

Os limiares biomecânicos sintetizados — 88,06 kPa como referência baropodométrica de risco ulcerativo (LEAL et al., 2019), 200 kPa como limiar de sobrecarga crítica (BUS et al., 2020b), 32 kPa como limite de tolerância muscular (OOMENS et al., 2015) e 25% como meta mínima de redução por *off-loading* — constituem parâmetros quantificados que a prática podológica pode operacionalizar com os instrumentos atualmente disponíveis, desde que sustentada em avaliação podobarométrica individualizada.

A monitorização térmica plantar diária com protocolo de resposta a assimetrias superiores a 2,2°C representa a fronteira mais acessível da prevenção primária no pé diabético de alto risco, com redução documentada de 49% no risco de nova ulceração (GOLLEDGE et al., 2022). A sua integração nos programas de educação terapêutica — e não apenas nas consultas especializadas de podologia — é a recomendação prática mais direta deste trabalho.

Investigação futura deverá explorar três eixos prioritários: a personalização da avaliação biomecânica através de modelos tridimensionais de elementos finitos adaptados à morfologia individual; a integração de sensores vestíveis para monitorização contínua de pressão e temperatura em contexto ambulatorio; e o desenvolvimento de modelos preditivos de risco sustentados em inteligência artificial, capazes de antecipar a ulceração com suficiente antecedência para que a intervenção preventiva seja efetiva. A prevenção das amputações

associadas ao pé diabético não é uma aspiração — é uma meta clínica alcançável, desde que sustentada na evidência biomecânica que este campo tem produzido com rigor crescente.

REFERÊNCIAS

ARMSTRONG, D. G.; BOULTON, A. J. M.; BUS, S. A. Diabetic foot ulcers and their recurrence. *New England Journal of Medicine*, v. 376, n. 24, p. 2367–2375, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJMr1615439>.

ARKSEY, H.; O'MALLEY, L. Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, v. 8, n. 1, p. 19–32, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>.

BORKOSKI, S.; ROUKIS, T. Biomechanics of the diabetic foot. *Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*, v. 29, n. 3, p. 363–381, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpm.2012.04.001>.

BUS, S. A. et al. Guidelines on the prevention of foot ulcers in persons with diabetes (IWGDF 2019 update). *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, v. 36, supl. 1, e3269, 2020a.

BUS, S. A. et al. Guidelines on offloading foot ulcers in persons with diabetes (IWGDF 2019 update). *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, v. 36, supl. 1, e3274, 2020b.

BUS, S. A. et al. Guidelines on offloading foot ulcers in persons with diabetes (IWGDF 2023 update). *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, v. 40, n. 3, e3647, 2024.

GOLLEDGE, J. et al. Efficacy of at-home monitoring of foot temperature for risk reduction of diabetes-related foot ulcer: a meta-analysis. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, v. 38, n. 7, e3549, 2022.

GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information & Libraries Journal*, v. 26, n. 2, p. 91–108, 2009.

JIMÉNEZ CERQUERA, C.; ZAMBRANO BERMEJO, R. N.; MANRIQUE JULIO, J. E. Relationship between skin temperature and pressure injuries: a systematic review. *Applied Sciences*, v. 15, n. 17, 9537, 2025.

LAVERY, L. A. et al. Home monitoring of foot skin temperatures to prevent ulceration. *Diabetes Care*, v. 30, n. 1, p. 14–20, 2007.

LEAL, C. et al. Relevância das pressões plantares como medida de prevenção de ulceração em pessoas com pé diabético em Portugal. *Saúde & Tecnologia*, n. 21, p. 51–59, 2019.

LUBOZ, V. et al. Foot ulcer prevention using biomechanical modelling. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, v. 2, n. 4, p. 189–196, 2014.

MAK, A. F. T.; ZHANG, M.; TAM, E. W. C. Biomechanics of pressure ulcer in body tissues interacting with external forces during locomotion. *Annual Review of Biomedical Engineering*, v. 12, p. 29–53, 2010.

MONTEIRO-SOARES, M. et al. Diabetic foot ulcer classifications: a critical review. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews*, v. 36, supl. 1, e3272, 2020.

OOMENS, C. W. J. et al. Pressure induced deep tissue injury explained. *Annals of Biomedical Engineering*, v. 43, n. 2, p. 297–305, 2015.

PETERS, M. D. J. et al. Updated methodological guidance for the conduct of scoping reviews. *JBIM Evidence Synthesis*, v. 18, n. 10, p. 2119–2126, 2020.

TRICCO, A. C. et al. PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, v. 169, n. 7, p. 467–473, 2018.