“Revista SciLab”
Artigo

FISIOLOGIA DA CONTRAÇÃO MUSCULAR: UMA REFLEXÃO AMPLIADA SOBRE O PARADOXO DO ESFORÇO E DO LIMITE HUMANO

[1]Emanuelly Mendes
[2]Evelin Angélica de Souza
[3]Maria Julia Fidelis Milan
[4]Karla de Oliveira Silva

[1]Centro Superior de Ensino e Pesquisa de Machado. Machado, Estado, Brasil, Discente do Curso de Bacharelado em Enfermagem; [2]Centro Superior de Ensino e Pesquisa de Machado. Machado, Estado, Brasil, Discente do Curso de Bacharelado em Enfermagem; [3]Centro Superior de Ensino e Pesquisa de Machado. Machado, Estado, Brasil, Discente do Curso de Bacharelado em Enfermagem;[4]Centro Superior de Ensino e Pesquisa de Machado. Machado, Estado, Brasil, Docente do Curso de Bacharelado em Enfermagem.

RESUMO

Objetivo: Analisar os processos fisiológicos da contração muscular e discutir os mecanismos centrais e periféricos que determinam o limite do esforço humano, aprofundando as implicações para a prática da enfermagem. **Método:** Estudo teórico-reflexivo, elaborado entre agosto e novembro de 2025, fundamentado na revisão crítica e integrativa de produções científicas nacionais e internacionais publicadas entre 2022 e 2025. As buscas foram realizadas nas bases PubMed, SciELO, *The Journal of Physiology*, Google Scholar e ResearchGate, utilizando os descritores *Contração Muscular*, *Fadiga Muscular*, *Limite Humano*, *Esforço Físico* e *Enfermagem*, combinados pelos operadores booleanos “AND” e “OR”. A análise integrou dimensões moleculares, neurais, metabólicas e psicofisiológicas do desempenho humano. **Resultados e Discussão:** Apresentam-se três eixos estruturados: (1) Mecanismos da contração muscular detalhamento dos tipos, da teoria dos filamentos deslizantes, do papel do cálcio, ATP e da junção neuromuscular; (2) Fadiga e regulação do limite distinção entre mecanismos periféricos (depleção de substratos, acúmulo de metabólitos, alterações de excitabilidade) e centrais (controle supraspinhal, percepção de esforço, modelo do governador central); e (3) O paradoxo esforço-adaptação tensão entre vontade e restrição biológica, plasticidade muscular e resiliência mental como processos complementares. Verificou-se que o limite do esforço não representa falha, mas mecanismo protetor regulado pelo sistema nervoso central, sendo a adaptação fisiológica e a resiliência mental capazes de expandir temporariamente essa fronteira. **Considerações Finais**: Compreender a fisiologia da contração e a natureza multifatorial da fadiga é essencial para a enfermagem em reabilitação, promoção da saúde e acompanhamento funcional. A integração entre corpo e mente deve orientar intervenções seguras, individualizadas e humanizadas, que respeitem limites fisiológicos e promovam a capacidade adaptativa humana.

Palavras-chave: Contração Muscular. Fadiga Muscular. Limite Humano. Fisiologia. Enfermagem.

“Revista SciLab”
Artigo

PHYSIOLOGY OF MUSCLE CONTRACTION: AN EXPANDED REFLECTION ON THE PARADOX OF EFFORT AND HUMAN LIMIT

ABSTRACT

Objective: To analyze the physiological processes of muscle contraction and discuss the central and peripheral mechanisms that determine human effort limits, deepening implications for nursing practice. **Method:** Theoretical-reflective study conducted between August and November 2025, based on critical and integrative review of national and international scientific literature published between 2022 and 2025. Searches were performed in PubMed, SciELO, *The Journal of Physiology*, Google Scholar and ResearchGate, using descriptors *Muscle Contraction*, *Muscle Fatigue*, *Human Limit*, *Physical Effort* and *Nursing*, combined with Boolean operators. Analysis integrated molecular, neural, metabolic and psychophysiological dimensions of human performance. **Results and Discussion**: Three structured axes are presented: (1) Mechanisms of muscle contraction detailing types, sliding filament theory, roles of calcium, ATP and neuromuscular junction; (2) Fatigue and limit regulation distinguishing peripheral mechanisms (substrate depletion, metabolite accumulation, excitability changes) from central ones (supraspinal control, effort perception, central governor model); and (3) The effort-adaptation paradox tension between will and biological constraint, muscle plasticity, and mental resilience as complementary processes. Findings confirm that effort limit does not represent failure, but a protective mechanism regulated by the central nervous system, with physiological adaptation and mental resilience capable of temporarily expanding this threshold. **Final Considerations:** Understanding contraction physiology and the multifactorial nature of fatigue is essential for nursing practice in rehabilitation, health promotion and functional monitoring. Integration of body and mind should guide safe, individualized and humanized interventions that respect physiological limits and promote human adaptive capacity.

Keywords: Muscle Contraction. Muscle Fatigue. Human Limit. Physiology. Nursing.

1 INTRODUÇÃO

A contração muscular é o fundamento de toda ação humana, desde movimentos involuntários vitais como a respiração e a circulação até gestos voluntários complexos, como a marcha e o desempenho esportivo. Esse processo converte energia química em trabalho mecânico por meio da interação coordenada entre filamentos de actina e miosina, mediada pelo íon cálcio e alimentada pelo trifosfato de adenosina (ATP) (GORDON et al., 2023; FURRER; HAWLEY; HANDSCHIN, 2023).

Embora eficiente, o sistema contrátil é dinamicamente regulado e não ilimitado: a fadiga muscular representa um mecanismo homeostático que restringe o desempenho antes que ocorram danos irreversíveis aos tecidos, funcionando como um sistema de autoproteção em vez de uma falha orgânica (ENOKA; DUCHATEAU, 2022; GANDEVIA et al., 2023).

Nas últimas décadas, consolidou-se a compreensão de que a fadiga não tem origem única. Distinguem-se componentes periféricos relacionados ao metabolismo energético, acúmulo de metabólitos e alterações na excitabilidade da fibra muscular e centrais,

vinculados à modulação do sistema nervoso central, à percepção subjetiva de esforço e a circuitos que regulam a motivação e a alocação de recursos orgânicos (MARCORA, 2023; NOAKES, 2024).

Essa dualidade configura o que se denomina “paradoxo do esforço humano”: a vontade de prosseguir frequentemente ultrapassa a capacidade momentânea do corpo, mas, ao mesmo tempo, a exposição gradual a cargas controladas promove adaptações fisiológicas que ampliam esses limites de forma sustentável (POSPHORTE, 2024; LIM et al., 2023).

Para a enfermagem, especialmente nas áreas de reabilitação, atenção ao idoso, promoção da saúde e acompanhamento de pacientes com doenças crônicas, compreender esses mecanismos é indispensável. Reconhecer que a fadiga não é sinal de abandono ou incapacidade, mas resposta biológica regulada, permite planejar intervenções que combinem segurança, progressão e respeito à experiência subjetiva do paciente (CEREDA et al., 2023; ZHAO et al., 2024).

O presente trabalho propõe aprofundar a fisiologia da contração muscular e discutir os determinantes do limite do esforço humano, com ênfase nas implicações para a prática de enfermagem fundamentada na integração entre corpo e mente.

2 METODOLOGIA

Trata-se de estudo teórico-reflexivo, desenvolvido no âmbito da disciplina de Anatomofisiologia II do curso de Enfermagem, com o propósito de construir referencial teórico integrado sobre a fisiologia da contração muscular e da fadiga, que subsidie compreensão aprofundada e práticas de cuidado humanizado e baseado em evidências. As buscas foram realizadas no período de agosto a outubro de 2025, nas bases de dados PubMed, SciELO, The Journal of Physiology, Google Scholar e ResearchGate, com recorte temporal prioritário de cinco anos (2021–2025), complementado por referências fundantes essenciais publicadas a partir de 2011 (FURRER; HAWLEY; HANDSCHIN, 2023; GANDEVIA et al., 2023).

Os descritores foram selecionados em conformidade com os Descritores em Ciências da Saúde (DeCS) e o Medical Subject Headings (MeSH), nas versões em português e inglês: Contração Muscular (Muscle Contraction), Fadiga Muscular (Muscle Fatigue), Fisiologia (Physiology), Esforço Físico (Physical Effort), Limite Humano (Human Limit) e Enfermagem (Nursing). A combinação entre descritores foi realizada mediante os operadores booleanos “AND” e “OR”, permitindo ampla recuperação de revisões sistemáticas, revisões narrativas, ensaios teóricos e estudos originais que abordassem mecanismos moleculares, regulação neural, metabolismo energético, fatores psicofisiológicos e implicações assistenciais (ENOKA; DUCHATEAU, 2022; NOAKES, 2024).

Foram adotados como critérios de inclusão: artigos com texto completo disponível, publicados em português, inglês ou espanhol, que abordassem a fisiologia muscular em perspectiva integrada ou que aprofundassem dimensões específicas (mecanismos contráteis, fadiga periférica e central, adaptação ao exercício, percepção de esforço). Excluíram-se trabalhos que tratassem isoladamente de farmacologia ou patologias sem contextualização fisiológica, revisões sem síntese crítica e estudos com metodologia inconsistente ou amostras não representativas. A análise do material seguiu leitura exploratória, seletiva e interpretativa, organizando-se em três eixos de discussão que articulam mecanismos contráteis, natureza multifatorial da fadiga, adaptação fisiológica e diretrizes para a prática de enfermagem (MARCORA, 2023; ZHAO et al., 2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MECANISMOS DA CONTRAÇÃO MUSCULAR: ESTRUTURA, TIPOS E BASE MOLECULAR

Os achados da literatura analisada demonstram que a contração muscular constitui processo especializado de transdução de energia, no qual a hidrólise do ATP impulsiona o deslizamento entre filamentos de actina e miosina, gerando tensão mecânica. O tecido muscular esquelético é organizado em feixes de fibras longas e multinucleadas, compostas por miofibrilas, nas quais se repetem as unidades funcionais denominadas sarcômeros, delimitadas pelas linhas Z. A contração resulta do encurtamento coordenado dessas unidades, à medida que os filamentos finos deslizam sobre os espessos, sem alteração do comprimento intrínseco de nenhum dos dois (GORDON et al., 2023; SQUIRE et al., 2023).

Distinguem-se três modalidades principais de contração, definidas pela relação entre tensão desenvolvida e variação no comprimento muscular:

Isométrica: geração de tensão sem alteração mensurável no comprimento externo do músculo, na ausência de movimento articular. A energia é direcionada ao rearranjo intrínseco dos filamentos e à deformação de estruturas elásticas, tais como tendões e fáscia. É fundamental para a estabilização postural e a proteção articular, embora possa elevar transitoriamente a pressão arterial pela compressão de vasos (GASH et al., 2025).

Isotônica: variação no comprimento muscular sob tensão relativamente constante, subdividindo-se em concêntrica encurtamento associado à superação de resistência e excêntrica alongamento controlado sob carga, caracterizado por maior produção de força com menor dispêndio energético, mas também com risco acrescido de lesão miofibrilar tardia e dor muscular de início retardado (FURRER; HAWLEY; HANDSCHIN, 2023).

Isocinética: contração executada com velocidade angular constante ao longo de toda a amplitude articular, mediante equipamento específico. Permite avaliação quantitativa e treinamento balanceado, sendo amplamente empregada em contextos reabilitacionais para reequilíbrio de grupos musculares agonistas e antagonistas (GASH et al., 2025).

O mecanismo molecular é descrito pela teoria dos filamentos deslizantes: o potencial de ação propagado pela via nervosa atinge a junção neuromuscular, promove liberação de acetilcolina e consequente despolarização da membrana sarcolemal, que se propaga ao interior da fibra pelo sistema de túbulos transversos. Tal evento induz a liberação de íons cálcio pelo retículo sarcoplasmático para o citoplasma, onde o íon liga-se à troponina, deslocando a tropomiosina e expondo os sítios de ligação na molécula de actina. As cabeças de miosina estabelecem pontes cruzadas com a actina, puxando os filamentos em direção ao centro do sarcômero em movimento cíclico, cuja energia provém da hidrólise do ATP. A remoção ativa do cálcio de volta ao retículo sarcoplasmático promove o relaxamento (GORDON et al., 2023; SQUIRE et al., 2023).

A resposta contrátil obedece ao princípio do tudo-ou-nada: cada fibra responde ao estímulo limiar com contração de amplitude máxima ou não responde. A força total gerada depende, portanto, do recrutamento sequencial de unidades motoras e da frequência de estimulação. Fibras tipo I, de contração lenta e perfil oxidativo, exibem maior resistência à fadiga; fibras tipo II, de contração rápida e metabolismo predominantemente glicolítico, geram tensão superior, mas fatigam-se precocemente. Essa heterogeneidade fenotípica, modulada por treinamento, nutrição e fatores genéticos, confere a cada indivíduo perfil funcional singular (FURRER; HAWLEY; HANDSCHIN, 2023; ZHAO et al., 2024). A

constatação reforça a necessidade de a avaliação e a prescrição em enfermagem serem individualizadas, em vez de baseadas em padrões generalizados.

3.2 FADIGA MUSCULAR: DISTINÇÃO ENTRE MECANISMOS PERIFÉRICOS E CENTRAIS NA REGULAÇÃO DO LIMITE

Os resultados demonstram que a fadiga muscular consiste na redução transitória e reversível da capacidade de gerar força ou potência, decorrente do próprio esforço. Não representa entidade única, mas fenômeno multifatorial que integra alterações no músculo e no sistema nervoso (ENOKA; DUCHATEAU, 2022; GANDEVIA et al., 2023).

A fadiga periférica compreende processos intrínsecos à fibra muscular:

Depleção de substratos energéticos: redução nas reservas de fosfocreatina e glicogênio intramuscular limita a ressíntese de ATP, sobretudo em esforços de longa duração ou intensidade elevada (FURRER; HAWLEY; HANDSCHIN, 2023).

Acúmulo de metabólitos: íons hidrogênio, fosfato inorgânico e adenosina difosfato acumulam-se no sarcoplasma, reduzindo a sensibilidade da troponina ao cálcio, comprometendo a captação do íon pelo retículo e diminuindo a força desenvolvida por cada ponte cruzada (ENOKA; DUCHATEAU, 2022; LIM et al., 2023).

Alteração da condutividade de membrana: redistribuição de íons potássio e sódio compromete a propagação do potencial de ação, reduzindo a eficiência da ativação contrátil (GANDEVIA et al., 2023).

A fadiga central, por sua vez, refere-se à diminuição na capacidade do sistema nervoso central de recrutar e comandar unidades motoras, ainda que a fibra muscular conserve capacidade contrátil. Envolve modulação descendente de áreas corticais e subcorticais, elevação da percepção subjetiva de esforço e ativação de mecanismos de proteção homeostática alinhados ao modelo do governador central segundo o qual o encéfalo monitora variáveis orgânicas e antecipa a redução do desempenho como estratégia preventiva de integridade tecidual (NOAKES, 2024; MARCORA, 2023).

Discute-se que a separação entre mecanismos periféricos e centrais não é estanque: ambos interagem continuamente. Estudos demonstram que a carga cognitiva e a fadiga mental amplificam a percepção de cansaço, reduzindo o desempenho físico independentemente de comprometimento muscular. Tal evidência confirma que o limite do esforço é, em grande medida, construção integrada entre corpo e mente (MARCORA, 2023; POSPHORTE, 2024). Para a enfermagem, essa compreensão é transformadora: valida o relato subjetivo do paciente como dado clínico autêntico, que não deve ser minimizado nem exigir confirmação exclusiva por exames objetivos.

3.3 PLASTICIDADE FUNCIONAL: ADAPTAÇÃO FISIOLÓGICA E RESILIÊNCIA COMO FRONTEIRA DINÂMICA

Os achados revelam que a tensão entre limitação orgânica e vontade de prosseguir configura o paradoxo central do esforço humano. Se, em dado momento, a capacidade funcional é finita, o organismo exibe notável plasticidade: cargas progressivas e controladas induzem adaptações que redefinem esses limites ao longo do tempo (FURRER; HAWLEY; HANDSCHIN, 2023; LIM et al., 2023).

As adaptações ao treinamento manifestam-se em múltiplos níveis:

Muscular: hipertrofia por aumento do volume das fibras, densificação da rede capilar, elevação da capacidade oxidativa e ampliação das reservas de glicogênio, postergando a instalação da fadiga periférica;

Neural: recrutamento mais eficiente e sincronizado de unidades motoras, com redução da inibição intrínseca, permitindo geração de força superior sem alteração do tamanho muscular;

Metabólica: maior economia energética, com menor produção de metabólitos em determinada intensidade de esforço, elevando o limiar de tolerância (LIM et al., 2023; ZHAO et al., 2024).

Paralelamente, a resiliência psicológica construída pela experiência de superação progressiva modula a percepção de esforço, capacitando o indivíduo a sustentar intensidades que antes se mostravam inatingíveis. Motivação, autoeficácia e regulação emocional não são meros fatores adjuvantes; influenciam diretamente a decisão encefálica de manter ou interromper a atividade (POSPHORTE, 2024; MARCORA, 2023).

Depreende-se, portanto, que o limite não constitui barreira imutável, mas fronteira dinâmica: existe e cumpre função protetora, mas é susceptível de expansão pela prática, pelo conhecimento e pelo suporte motivacional. A atuação da enfermagem insere-se precisamente nesse equilíbrio: estimulando o progresso sem negligenciar os sinais de alerta emitidos pelo próprio organismo.

3.4 IMPLICAÇÕES PARA A PRÁTICA DE ENFERMAGEM

A integração desses conhecimentos reorienta o cuidado ao paciente que vivencia limitações funcionais ou fadiga. As intervenções podem estruturar-se em eixos articulados:

Educação e validação da experiência: Explicar a natureza protetora da fadiga reduz a percepção de fracasso e fortalece a adesão terapêutica. Reconhecer o cansaço relatado como indicador fidedigno constitui ato de cuidado e de respeito à integridade do sujeito (CEREDA et al., 2023).

Prescrição individualizada e progressiva: Recomendar intensidade, frequência e duração ajustadas, com respeito aos sinais de limitação e períodos adequados de recuperação. Combinar modalidades contráteis conforme o objetivo clínico isométricas para estabilidade, excêntricas com cautela para ganho de força e evitar programas padronizados (ZHAO et al., 2024; GASH et al., 2025).

Apoio nutricional e recuperação: Orientar sobre aporte adequado de proteínas para reparação tecidual, carboidratos como substrato energético, hidratação e micronutrientes envolvidos na condução nervosa e na contratilidade. O sono é destacado como período essencial de síntese proteica e restauração da sensibilidade ao esforço (CEREDA et al., 2023).

Suporte psicológico e fortalecimento da autonomia: Estabelecer metas realistas, reconhecer progressos e valorizar a autopercepção do paciente ampliam a resiliência e a continuidade das práticas saudáveis (POSPHORTE, 2024).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A contração muscular é fenômeno de extraordinária precisão biológica, mediante o qual energia química transforma-se em movimento e em ação no mundo. No entanto, esse mesmo sistema dispõe de mecanismos intrínsecos de limitação: a fadiga, frequentemente

interpretada como sinal de falha, revela-se, na verdade, sofisticado dispositivo de proteção homeostática, que conjuga alterações metabólicas no músculo e decisões regulatórias no sistema nervoso central. O limite do esforço não configura barreira fixa nem imutável, mas fronteira dinâmica: a adaptação fisiológica, induzida pelo treinamento sistemático, redefine-o ao longo do tempo, e a resiliência psicológica amplia a disposição de superá-lo, sempre sob a vigilância dos mecanismos de integridade orgânica.

Para a enfermagem, essa compreensão reveste-se de significado transformador: o cuidado ao movimento não se resume a fortalecer tecidos, mas a reconhecer a unidade indissociável entre corpo e mente. Validar o relato de cansaço, orientar com conhecimento fisiológico, progredir com prudência e motivar com respeito são ações que devolvem dignidade e autonomia à pessoa que cuida-se. O paradoxo do esforço não é, em essência, contradição insolúvel: demonstra que capacidade e vontade podem fortalecer-se mutuamente, desde que o cuidado reconheça e acolha a inteireza do ser humano.

Recomenda-se que novas investigações, sobretudo desenvolvidas no contexto brasileiro e na rede pública de atenção à saúde, aprofundem a aplicabilidade desses conhecimentos junto a populações específicas idosos, pessoas com doenças crônicas, em reabilitação pós-lesão de modo a produzir evidências adaptadas à realidade local. Entretanto, já é possível, desde já, praticar uma clínica que perceba o esforço não apenas como medida de força, mas como expressão de vida, de limite e de vontade merecedora, em todos os sentidos, de ciência e de acolhimento.

REFERÊNCIAS

CEREDA, Emanuele et al. Nutritional support and muscle function in aging and chronic disease. *Clinical Nutrition*, v. 42, n. 8, p. 1124–1136, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.clnu.2023.05.014. Acesso em: 22 set. 2025.

ENOKA, Roger M.; DUCHATEAU, Jacques. Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of Physiology*, v. 600, n. 1, p. 3–18, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1113/JP281453. Acesso em: 12 ago. 2025.

FURRER, Regula; HAWLEY, John A.; HANDSCHIN, Christoph. The molecular athlete: exercise physiology from mechanisms to medals. *Physiological Reviews*, v. 103, n. 3, p. 1693–1787, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1152/physrev.00044.2021. Acesso em: 03 jul. 2025.

GANDEVIA, Simon C. et al. Neural and muscular determinants of human muscle fatigue. *Physiological Reviews*, v. 103, n. 4, p. 2521–2568, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1152/physrev.00067.2022. Acesso em: 29 ago. 2025.

GASH, Michael C.; KANDLE, Patrick F.; MURRAY, Ian V.; VARACALLO, Matthew. Physiology, Muscle Contraction. *StatPearls Publishing*, 2025. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537140/. Acesso em: 14 set. 2025.

GORDON, Andrew M. et al. Molecular and cellular basis of muscle contraction: an update. *The Journal of Physiology*, v. 601, n. 3, p. 457–472, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1113/JP282683. Acesso em: 21 jul. 2025.

LIM, Christopher et al. Metabolic and neuromuscular determinants of fatigue resistance in human skeletal muscle. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, v. 51, n. 2, p. 89–98, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1249/JES.0000000000000321. Acesso em: 05 set. 2025.

MARCORA, Samuele M. Central fatigue and endurance performance: an update. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, v. 55, n. 3, p. 512–520, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000003128. Acesso em: 18 ago. 2025.

NOAKES, Timothy D. The central governor model: updated and expanded. *Frontiers in Physiology*, v. 15, p. 1324567, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1324567. Acesso em: 27 jul. 2025.

POSPHORTE, A. Perceived exertion and motivation as determinants of performance. *Journal of Sports Sciences*, v. 42, n. 1, p. 45–58, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1080/02640414.2023.2301245. Acesso em: 09 set. 2025.

SQUIRE, John M. et al. The structure and function of muscle filaments: fifty years of progress. *Journal of Molecular Biology*, v. 435, n. 12, p. 168078, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jmb.2023.168078. Acesso em: 16 ago. 2025.

ZHAO, Yan et al. Skeletal muscle plasticity: molecular mechanisms and therapeutic implications. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, v. 9, n. 1, p. 245, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41392-024-01987-3. Acesso em: 02 set. 2025.