U.PORTO

MESTRADO INTEGRADO EM MEDICINA

Utilização de Fibra de Carbono em Implantes Ortopédicos: novas possibilidades e perspetivas

Rui Bernardo Pereira Carvalhal

M

2025

Utilização da Fibra de Carbono em Implantes Ortopédicos: novas possibilidades e perspetivas

Dissertação de candidatura ao grau de Mestre em Medicina, submetida ao Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar – Universidade do Porto

Rui Bernardo Pereira Carvalhal

Aluna do 6º ano profissionalizante do Mestrado Integrado em Medicina

Afiliação: Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar, Universidade do Porto

Endereço Eletrónico: up201907192@up.pt

Orientador: Dr. Pedro Filipe Ferreira Cardoso

Assistente Graduado de Ortopedia na Unidade Local de Saúde de Santo António EPE

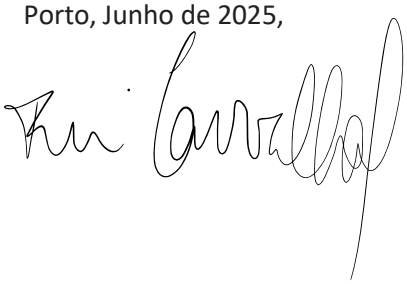
Afiliação: Professor associado convidado do Mestrado Integrado em Medicina do Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar

Junho, 2025

Declaração de Integridade Científica

Eu, Rui Bernardo Pereira Carvalhal, nº 201907192, estudante do 6º ano do Mestrado Integrado em Medicina do Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar- Universidade do Porto, declaro que esta dissertação é da minha autoria e não foi utilizada anteriormente em qualquer outro curso ou unidades curriculares, desta ou de outra instituição. As referências a outros autores (afirmações, ideias, pensamentos) respeitam escrupulosamente as regras de atribuição e estão devidamente indicadas no texto e nas referências bibliográficas, de acordo com as regras de referenciação. Tenho conhecimento de que a prática de plágio e auto-plágio constitui uma infração académica.

Porto, Junho de 2025,



Assinado por : **PEDRO FILIPE FERREIRA CARDOSO**
Num. de Identificação: 05911750
Data: 2025.06.07 12:57:37+01'00'

CARTÃO DE CIDADÃO

Resumo

Introdução: Os implantes ortopédicos, apesar de terem sofrido grandes avanços nos últimos tempos, continuam uma solução imperfeita. As propriedades intrínsecas dos compostos usados são inadequadas e deletérias para a uma cura ou estabilização de fratura eficaz. Assim, necessita-se de novos materiais como a fibra de carbono. Na forma de CFR PEEK, um polímero, apresenta várias características interessantes. Primeiramente, a baixa densidade torna-a bastante leve, secundariamente, apresenta alta rigidez e, finalmente, destaca-se pela sua resistência à deformação tendo uma força especifica extremamente alta. Destarte, é um dos materiais que se têm apresentado nos últimos tempos como possível solução para os problemas com os quais nos deparamos.

Objetivos: O objetivo deste trabalho é averiguar o estado da arte, ou seja, resumir as vantagens e desvantagens associadas à utilização de fibra de carbono como material principal na elaboração de implantes ortopédicos. Assim, o trabalho terá um foco especial na comparação com outros materiais mais estabelecidos.

Métodos: Foi feita uma pesquisa nas plataformas eletrónicas PubMed e ScienceDirect usando termos como: *carbon fiber, orthopedic implant, carbofix*. Selecionou-se artigos publicados em inglês entre janeiro de 2015 e agosto de 2024. Foram eliminados estudos duplicados. Foi então avaliada a relevância do título e posteriormente o abstrato dos artigos. Finalmente, os artigos foram lidos para serem analisados quanto à sua relevância para esta discussão.

Conclusão: A fibra de carbono é um material com um bom perfil de segurança. A superioridade deste material é ainda uma questão em aberto, mas com sinais positivos. O panorama geral deve motivar mais investigação nesta matéria, especialmente com follow-ups maiores. Existem, contudo, algumas questões que podem ser melhoradas com o treino dos profissionais e ajustes nas características do CFR PEEK, não obstante existe uma possibilidade deste material passar a ter um lugar estabelecido em ortopedia.

Palavras-chave: Implantes ortopédicos, fibra de carbono, CFR PEEK, traumatologia, oncologia

Abstract

Introduction: Orthopedic implants, despite significant recent advancements, remain an imperfect solution. The intrinsic properties of the compounds used are inadequate and detrimental to effective fracture healing or stabilization. Thus, new materials such as carbon fiber are needed. In the form of CFR-PEEK, a polymer, it exhibits several interesting characteristics. Firstly, its low density makes it very lightweight; secondly, it has high stiffness; and finally, it stands out for its resistance to deformation, having an extremely high specific strength. Therefore, it is one of the materials that has recently emerged as a potential solution for the challenges we face.

Objectives: The aim of this study is to assess the state of the art, summarizing the advantages and disadvantages associated with using carbon fiber as the main material in the development of orthopedic implants. Thus, the work will have a special focus on comparing it with other more established materials.

Methods: A search was conducted on the electronic platforms PubMed and ScienceDirect using keywords such as: *carbon fiber, orthopedic implant, carbofix*. Articles published in English between January 2015 and August 2024 were selected. Duplicate studies were excluded. The relevance of the titles was then assessed, followed by the abstracts of the articles. Finally, the articles were read to analyze their relevance to this discussion.

Conclusion: Carbon fiber is a material with a good safety profile. The superiority of this material is still an open question, but there are positive signs. The overall outlook should encourage further research on this topic, especially with larger follow-ups. However, some issues could be improved through professional training and adjustments to the characteristics of CFR-PEEK. Nevertheless, there is a possibility that this material may become an established part of orthopedic practice.

Key Words: Orthopedic implants, carbon fiber, CFR PEEK, traumatology, oncology

Lista de abreviaturas

CFR PEEK- carbon fiber reinforced polyetheretherketone
PAN- poliacrilonitrilo
PEEK- polyetheretherketone
RMN- ressonância magnética nuclear
TAC- tomografia axial computurizada

Índice

Índice

Resumo ..... *i*

Abstract ..... *ii*

Lista de abreviaturas ..... *iii*

Índice ..... *iv*

Lista de tabelas ..... *v*

Lista de figuras ..... *vi*

Introdução *1*

Métodos *2*

Parâmetros Mecânicos *2*

Aspetos Biológicos *4*

Uso em Ortopedia *4*

Oncologia *5*

Traumatologia *7*

Conclusão *8*

Apêndice *12*

Bibliografia *13*

Lista de tabelas

Tabela I- Comparação de propriedades físicas

Lista de figuras

Figura 1- Estrutura molecular da fibra de carbono
Figura 2- Implante de CFR PEEK após remoção de sarcoma de Ewing

Introdução

A medicina, como ciência que estuda um campo extenso e variado como o corpo humano, frequentemente necessita de ir em busca de novos conceitos ou inovações presentes noutras áreas do saber humano. A ortopedia, por sua vez, tende a aproveitar muito do que se prende com inovações em materiais e, consequentemente, o seu interesse particular em novos materiais promissores, como é o caso da fibra de carbono. Os implantes ortopédicos, apesar de terem sofrido grandes avanços nos últimos tempos, continuam uma solução imperfeita por várias razões, nomeadamente devido às características dos materiais utilizados, que diferem significativamente das do osso humano. Em particular a elasticidade e rigidez destes materiais, normalmente metais como cromo cobalto ou titânio, o que pode levar a falhas catastróficas ou desgaste excessivo do osso. [1,2]

Existem essencialmente três tipos de materiais usados em implantes ortopédicos: metais, polímeros e biocerâmicas. [1]

Quanto aos metais, podemos afirmar que existem vários tipos utilizados, tais como o aço inoxidável e o titânio, que variam em termos das suas qualidades mesmo dentro do seu próprio tipo dependendo do pretendido. Apesar dos ajustes possíveis, o aço inoxidável é mais rígido, mais denso e mais dúctil e tem um módulo elástico e limite de escoamento maiores. Por outro lado, o titânio tem um torque máximo maior e maior resistência à fadiga. Além disso, a superfície rugosa do titânio permite uma melhor osseointegração. O magnetismo do aço inoxidável produz distorções maiores em imagens com recurso a radiação X. Os implantes de ligas de titânio detêm claras vantagens no que concerne à minimização da toxicidade dos detritos metálicos. Podemos concluir que as ligas metálicas, pela sua rigidez excessiva, atuam de forma contraproducente na manutenção da massa óssea saudável.[1]

No que se refere aos polímeros, sabe-se que estes apresentam uma maior resistência à fadiga, grande força estrutural e baixa rigidez. Assim, permitem a manutenção da massa óssea saudável e promovem a regeneração da fratura através de uma minimização não excessiva das forças de tensão sobre o osso. Apesar das suas vantagens, antevê-se a necessidade de tornar o material mais rijo através do aumento do seu diâmetro. A fibra de carbono inclui-se na categoria de polímeros supracitados numa forma conjugada com PEEK (poli(éter-éter-cetona)).[1]

Finalmente das biocerâmicas conclui-se que são um material que isoladamente é pouco utilizado. São bastante propensas a fraturas e possuem um módulo de elasticidade muito alto, não sendo o material mais apropriado para fixação óssea interna. Têm um papel mais limitado, sendo utilizadas em conjunto com as outras duas categorias de materiais.[1]

Assim, torna-se relevante procurar materiais novos mais adequados às necessidades das patologias enfrentadas nesta área, que nos permitam oferecer tratamentos mais adaptados aos doentes. Com isto, um dos materiais que se tem apresentado nos últimos tempos como possível solução para os problemas com os quais nos deparamos é a fibra de carbono pelas suas propriedades intrínsecas. Logo, este trabalho propõe-se a analisar as vantagens e desvantagens deste material, nomeadamente, no que diz respeito aos implantes ortopédicos em três situações: oncológicas, esqueleto axial e esqueleto apendicular.

Métodos

Foi feita uma pesquisa nas plataformas eletrónicas PubMed e ScienceDirect usando os seguintes termos: *carbon fiber, orthopedic implant, carbofix*. Os critérios de inclusão foram artigos sobre implantes em fibra de carbono comparando-os com implantes metálicos publicados em inglês entre janeiro de 2015 e agosto de 2024. Os critérios de inclusão incluíram meta-análises, revisões sistemáticas, estudos randomizados controlados e estudos prospetivos de coorte. Foram eliminados estudos duplicados.

Foi então avaliada a relevância do título e posteriormente o abstrato dos artigos não excluídos. Finalmente, os artigos foram lidos para serem analisados tanto quanto à sua metodologia como resultados, confirmando, assim, a sua relevância para esta discussão.

Numa fase inicial foram selecionados 117 artigos. Posteriormente, esses mesmos artigos foram analisados quanto à sua relevância e centralidade quanto ao tema em questão. Após leitura de resumos e eliminação de duplicados restaram 32 artigos, sendo esses utilizados para a elaboração desta revisão narrativa.

Parâmetros Mecânicos

A fibra de carbono é uma fibra sintética composta pela por poliacrilonitrila (PAN), um produto obtido a partir da polimerização de nitrila de acrílico. Após a polimerização as fibras são fiadas através de um processo chamado *wet spinning* (fiação molhada). Consequentemente, estas são estabilizadas sob uma atmosfera oxidativa, posteriormente, carbonizadas e grafitizadas em atmosfera inerte, o grau deste último processo é variável sendo mais extenso nas fibras que são destinadas aos mais altos desempenhos. Alternativamente, pode-se produzir fibra de carbono a partir de piche seguindo os seguintes passos: preparação do piche, melt spinning (fiação de fusão), infusibilização em atmosfera oxidativa, carbonização e grafitização em atmosfera inerte. As fibras produzidas são compostas maioritariamente por carbono em termos de peso (cerca de 92% do peso total). As fibras com origem em piche podem vir a atingir módulos de elasticidade mais elevados devido à sua capacidade superior de grafitização e as com origem em PAN maior resistência à tração. Cerca de 90% das fibras fabricadas em 1990 foram a partir de PAN mas a percentagem de fibras de piche tem vindo a aumentar.[3,4]

Ao nível molecular a fibra de carbono organiza-se em folhas, cada camada com um átomo de espessura, organizadas em padrão de favo de mel. Entre as folhas estabelecem-se ligações de Van Der Waals, permitindo deslizamento entre elas. As camadas de carbona tendem a ser paralelas ao eixo da fibra, possibilitando as propriedades elásticas exibidas por elas.**(ver figura 1)** [3, 4]

A fibra de carbono apresenta várias características como material que a tornam muito interessante. Primeiramente, é um material de baixa densidade, tornando-o bastante leve, de alta rigidez, destacando-se mesmo pela sua alta resistência à deformação tendo uma força específica extremamente alta. O material apresenta ainda um ponto de fusão muito alto, cerca de 3700 ºC. A maior desvantagem deste material é a sua ductilidade baixa. Existem ainda diferentes tipos de fibra de carbono comercializados correntemente, que diferem consoante as características desejadas do material, nomeadamente, alta força específica ou alto módulo de elasticidade.[3,4]

De notar, também, que a descida de preços de fabrico da fibra de carbono tem contribuído imensamente para a diversificação das suas aplicações.[3, 4]

A fibra de carbono usada em implantes ortopédicos encontra-se na forma de CFR PEEK (carbon fiber reinforced poliether-ether-ketone), isto é, o material usado é uma construção composta reforçada com termoplástico. Através do tamanho e orientação das fibras de carbono utilizadas e aplicadas podemos alterar e ajustar certas propriedades físicas como o módulo de elasticidade ou rigidez. Assim, podemos comparar os metais com que os implantes convencionais são feitos com o CFR PEEK e osso cortical humano nos seguintes parâmetros: módulo de Young, limite de resistência e resistência flexional. A fibra de carbono nesta formulação pode assumir valores de módulo de Young na ordem dos 13-18 GPa e um limite de resistência à tração de 120 MPa. Comparativamente, o osso cortical humano apresenta valores de 12-14 GPa de módulo de Young e 104-121 MPa de resistência à tração. Por outro lado, os materiais utilizados correntemente apresentam valores muito diferentes daqueles dos do CFR PEEK e, consequentemente, do osso cortical. O titânio, por exemplo, demonstra valores de 120 GPa de módulo de Young, um limite de resistência de pelo menos 600 MPa e resistência flexional de 880 Nm. O aço inoxidável 316, por sua vez, tem um módulo de Young de 200 GPa e 580 MPa de limite de resistência, a sua resistência flexional é de 750 Nm. Logo, a resistência flexional do CFR PEEK material é também superior à dos demais, cerca de 1000 Nm.**(ver tabela 1)**[5, 6]

Materiais	**Módulo de Young** (GPa)	**Limite de resistência à tração** (MPa)	**Resistência flexional** (Nm)
Osso cortical humano	12-14	104-121	*
CFR PEEK	13-18	120	1.000**
Titânio (Ti-6Al-4V)	120	600	880**
Aço inoxidável 316L	200	580	750**

Tabela 1 – Comparação de propriedades físicas. Adaptado de Biomechanical properties (Internet).[6,7]

* - Varia consoante o osso

** - Executado em placas diafisárias de 4.5 mm

Assim, podemos concluir que a fibra de carbono se expande, como indicado pelo módulo de Young a um ritmo muito semelhante ao do osso cortical humano, ao contrário dos metais e ligas metálicas correntemente utilizados. O limite de resistência à tração, também, nos permite perceber que o CFR PEEK não resguardará o osso excessivamente em relação às forças externas nele exercidas. Este material pode, adicionalmente, ser bastante vantajoso na união de topos de fraturas devido à sua rigidez, dificultando a sua separação e diminuindo a posterior não-união.[5, 6, 7]

A resistência à fadiga é significativamente superior à de outros materiais, prometendo, assim, ser um material com grande longevidade.[5]

Atualmente, é utilizada como material de excelência na indústria aeroespacial e no automobilismo, apesar de ter começado por ser uma fibra utilizada em lâmpadas incandescentes.[7]

Aspetos Biológicos

Existem vários usos para a fibra de carbono na medicina para além de implantes ortopédicos, tais como: próteses, pela leveza do material, utilização na radioterapia para suporte das partes irradiadas, ferramentas cirúrgicas e outros objetos como muletas ou cadeiras de rodas.[2]

A fibra de carbono apresenta como possíveis vantagens no campo da medicina a sua radiopacidade e módulo de elasticidade, estas propriedades são muito mais semelhantes às do osso humano. Adicionalmente, por apresentar um limite de fadiga altíssimo e características muito semelhantes ao osso cortical, a longevidade destes implantes é superior aos convencionais. Devido às propriedades físicas, este material tem um comportamento muito semelhante ao osso cortical humano, mimetizando-o na expansão e elasticidade e contribuindo para uma osteogénese eficaz e um osso saudável e forte. Tudo isto deve levar a uma maior longevidade das próteses, menor probabilidade de fraturas ósseas secundárias ou necessidade de reintervenções.[7]

Devido à sua radiopacidade, a fibra de carbono não interfere com a recolha de imagens por TAC (tomografia axial computorizada). Adicionalmente, no que concerne à aquisição de imagem por RMN (ressonância magnética nuclear), a prótese em si deixa de ser um fator limitante para este exame. No entanto os parafusos utilizados podem continuar a apresentar uma contra-indicação, apesar de também já existirem parafusos feitos do mesmo material. [2, 7]

Em termos mais gerais, a fibra de carbono já provou ser um material seguro, sendo bioinerte e com pouca libertação de detritos. A grande dúvida é, na verdade, se demonstra algum tipo de ganho em relação às ligas metálicas correntemente utilizadas, já que parece já ter sido amplamente demonstrada a sua não inferioridade e por vezes superioridade em modelos animais. A não inferioridade do material também tem vindo a ser demonstrada ao longo dos últimos anos, superando o CFR PEEK com os insucessos das iterações passadas da fibra de carbono. Interessa, ainda, explorar a possibilidade de novas técnicas cirúrgicas, ou ajustes às já existentes, que este material possa possibilitar.[2,8, 9]

Uso em Ortopedia

A utilização deste material em próteses começou, após ter sido introduzido na década de 80 do século passado, com o seu emprego em fixações de corpos vertebrais medulares. Mas esta fibra primitiva era diferente do CFR PEEK atual. O seu uso foi-se difundindo para outras áreas ortopédicas, como o trauma e hoje em dia este material integra os implantes utilizados em todas as subespecialidades ortopédicas. Assim, o CFR PEEK é considerado um substituto válido e possivelmente melhor às alternativas metálicas correntemente utilizadas.[7]

Deve-se ressalvar, contudo, que, ainda que este material esteja associado a um maior tempo de cirurgia, provavelmente pela necessidade de ajustes às técnicas cirúrgicas e inexperiência dos profissionais, constitui uma alternativa custo-efetiva às ligas metálicas convencionais.[10] Ainda que, segundo algumas publicações, o custo do material seja superior, no final de contas, os encargos

pecuniários não são tão expressivos quanto inicialmente se pensava. Segundo as fontes mais recentes, o custo superior chega a ser negligenciável ou inexistente, logo o aspeto económico-financeiro é cada vez menos uma limitação para a implementação deste material na prática médica.[10, 11]

Oncologia

A nível oncológico, os implantes ortopédicos são colocados para tratar fraturas patológicas, reconstrução de estruturas ósseas e ainda em cirurgias paliativas no caso de metástases implantadas na coluna vertebral. Pode haver, ainda, usos profiláticos como é o caso em certas patologias oncológicas em que uma fratura patológica é iminente.[12,13,14]

Estes implantes em fibra de carbono têm vindo a ganhar espaço, especialmente em oncologia ortopédica. Tal verifica-se pelas vantagens, algumas delas já enumeradas anteriormente, como a menor interferência com radiação utilizada em radioterapia e a translucência à radiação x. Durante as sessões de radioterapia a dose de radiação, nos casos em que é utilizado o CFR PEEK, pode ser significativamente menor pela menor atenuação, 30% no titânio e 5% com CFR PEEK, e pela maior absorção de radiação. A radiopacidade do titânio e outros metais tem implicações negativa na deteção de recidivas, resolvido com a utilização da fibra de carbono. Na TAC, a fibra de carbono apresenta sensivelmente a mesma densidade do material biológico, permitindo uma vigilância desimpedida da área previamente afetada pelo tumor.[7, 15-22]

No que concerne à necessidade de radioterapia, a fibra de carbono demonstra vantagens inegáveis, possibilitando uma dose menor de radiação e maior precisão aquando da irradiação da área alvo. Existe, no entanto, uma desvantagem relacionada com estas propriedades: a monitorização radioscópica na colocação dos implantes. A inclusão de pontas de titânio ou outros elementos radiopacos no implante podem ajudar com os problemas referidos. [7, 15-18, 21]

Em termos de propriedades físicas, a fibra de carbono apresenta qualidades que parecem adequar-se melhor aos objetivos da colocação de um implante do que as ligas metálicas clássicas em termos do apoio fornecido, incentivo à osteogénese e risco mínimo de eventos adversos, por reação com o metal tanto por reações alérgicas como pela degradação do mesmo pela oxidação. Estas qualidades são, de facto, observadas na prática, pelo menos a curto prazo.[7,16,19] É possível encontrar um consenso sobre as propriedades da fibra de carbono, verificando-se que esta apresenta características ou tão boas ou superiores aos outros materiais comparados na larga maioria das áreas em que os podemos comparar e em que tal é pertinente, união de fraturas, eventos adversos, limitações à mobilidade e velocidade de recuperação. Contudo, devido à novidade do material e inicio de utilização recente, não existem muitos dados sobre o seu desempenho a longo prazo, algo que necessitará de ser estudado. Em estudos multicêntricos, os resultados apontam para uma grande competência por parte do implante, traduzidas em altas taxas de formação de calo pós-cirúrgica e reconstruções biológicas, taxas estas semelhantes ou superiores às alternativas metálicas.[7,16] Logo, tudo parece apontar para uma conclusão tanto em estudos com dimensão menor até aos estudos multicêntricos. Por outro lado, este novo material pode desbloquear novas técnicas de estabilização vertebral.[7,9,14,16,19,23]

A fibra de carbono constitui um material versátil e, neste momento, transversal na oncologia ortopédica. Os implantes parecem adequar-se aos vários tipos de cirurgias: desde cavilhas intramedulares, placas aparafusadas até fixação de corpos vertebrais, passando pelos elementos de

fixação do implante. Em todos estes casos, os implantes não mostraram mais complicações pós operatórias, mormente no que diz respeito a fraturas de fadiga, desmontagem e infeção.[7,11,16,17] Importa destacar, também, que não foram reportadas quaisquer complicações possivelmente letais em populações submetidas a estes procedimentos. Para além disto, nos vários casos verificam-se as vantagens previamente enumeradas na vigilância e irradiação terapêutica das áreas de interesse, ainda que os parafusos utilizados sejam na sua maioria metálicos e como tal não partilham dos mesmos benefícios, embora estejam já disponíveis no mercado parafusos em fibra de carbono, como já anteriormente foi referido.**(ver figura 2)**[7,11,16, 17]

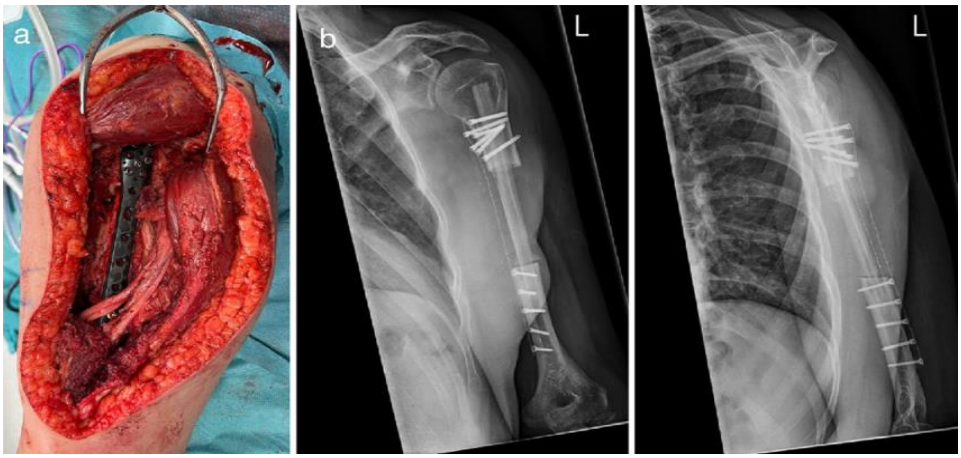


Figura 1 Implante de CFR PEEK após remoção de sarcoma de Ewing adaptado de Rijs Z, Weekhout A, Daniel S, et al. Carbon-fibre plates for traumatic and (impending) pathological fracture fixation: Where do we stand? A systematic review[14]

O CFR PEEK demonstrou ter alguns benefícios inicialmente não previstos. O efeito necrótico térmico da polimerização do cimento parece estar diminuído pelo isolamento térmico fornecido pela fibra de carbono. Desta maneira, podemos estar perante uma vantagem no tratamento, estabilidade e controlo da doença metastática local, assim como uma melhoria no controlo da dor.[24]

Existem ainda algumas dúvidas e possíveis fragilidades inerentes a este material, que permanecem, contudo, por confirmar. Entre as mais interessantes para o tratamento de pacientes oncológicos, restam as dúvidas sobre a capacidade destes implantes suportarem casos mais extremos, tais como fraturas patológicos cominadas. É interessante ainda notar que as taxas de falhas mecânicas tendem a aumentar com o bom prognóstico da doença neoplásica. Este facto estará muito provavelmente ligado à maior sobrevivência dos doentes com bom prognóstico. [23]Os fatores de risco para falha do implante aparentam ser iguais para o CFR PEEK e implantes em titânio. Encontram-se descritos na literatura a progressão da doença, carga metastática, prognóstico e localização do tumor como fatores de risco para a falha mecânica.[13, 23]

Alguns estudos referem ainda algumas desvantagens como os micromovimentos protagonizados pelo material, podendo ocorrer desmontagens. Adicionalmente, as próprias características do material podem tornar-se desvantagens, tais como a rigidez, elemento tão presado, pode dificultar extrações posteriores ou a conformação do material ao osso, visto não ser possível intraoperatoriamente moldar o implante ao osso manualmente. Possivelmente devido a uma curva de aprendizagem mais lenta alguns autores aperceberam-se da perda de um maior volume de sangue e fluoroscopias mais morosas em procedimentos com implantes em fibra de carbono, ainda que existam resultados dispares.[7] São referidas, adicionalmente, dificuldades, com a técnica cirúrgica, devido ao implante não ser canulado, logo não é possível utilizar um fio guia. [7,13,20,25,26]

Estes procedimentos beneficiariam enormemente da padronização de protocolos, treino dos profissionais envolvidos e prática para superar algumas destas dificuldades, que vários estudos relatam.[13]

Destarte, os implantes em CFR PEEK parecem ser muito capazes e, certamente, aptos a serem utilizados neste campo da ortopedia tanto em ossos longos dos membros inferiores e superiores como na coluna. Nem o tipo de neoplasia, se primária ou secundária, parece interferir negativamente com a adequabilidade deste novo material.[20,23,27,28]

Traumatologia

Quanto a causas traumáticas de fraturas, a fibra de carbono tem ganho espaço e credibilidade. Também nesta área, algumas vantagens da fibra de carbono podem ser exploradas para benefício dos doentes. Em primeiro lugar, o módulo de elasticidade deste material é muito semelhante ao do osso cortical, logo o osso não é excessivamente defendido das forças exercidas sobre ele, contribuindo para uma osteogénese eficaz e osso menos propenso à fratura, pode contribuir assim para uma convalescença mais curta. A própria rigidez mais semelhante à do osso, pode contribuir para uma melhor formação do calo ósseo, aspeto da maior importância na regeneração da fratura, promovendo este processo regenerativo. Suspeita-se então que as características intrínsecas da fibra de carbono supramencionadas possam ajudar numa recuperação mais rápida do que outras técnicas, correntemente utilizadas, têm vindo a conseguir. Por outro lado, a inércia biológica do material poderá contribuir a longo prazo para a estabilidade e saúde geral do doente, por exemplo, este material parece não libertar micropartículas, nem sofrer fenómenos de soldagem a frio, como acontece com o titânio. Mais uma vez, a transparência da fibra de carbono à radiação é uma vantagem na visualização da correta redução da fratura. Existem, até, autores que recomendam a utilização deste material em virtude deste facto, aproveitando-se destas qualidades para executar um controlo mais eficaz em TAC. Apesar dessas características teóricas, ainda são necessários muitos mais estudos experimentais que demonstrem a veracidade destas afirmações na prática.[7,29-31]

Em termos de funcionalidade, os resultados são bastante animadores. Os pacientes submetidos a procedimentos de fixação em fraturas do rádio e cúbito distal parecem ter preservado a mobilidade da área intervencionada, nestes casos parece não haver diferenças estatísticas entre os períodos pré e pós-operatórios. Alguns estudos reportam até uma recuperação mais rápida, mas este achado deve ser mais investigado e reproduzido para se poder concluir algo em definitivo. Para além disso, não só a fibra de carbono parece levar a uma convalescença diminuída , mas também a uma maior taxa de uniões pós-fixação, mesmo em fraturas mais complicadas e com outras lesões associadas.[2] Alguns destes achados já tinham sido reproduzidos em modelos animais. Adicionalmente, os pacientes demonstram também uma preservação da força de preensão em fraturas do rádio. Os resultados, no que toca ao ângulo do rádio, *tilt* volar, altura radial e variação cubital nos casos intervencionados, em estudos analisados, parecem ser animadores e positivos, contudo continua a haver uma diferença estatisticamente significativa entre o pré-operatório e o pós-operatório neste parâmetro. Entre grupos tratados com implantes metálicos e tratados com fibra de carbono não parece haver diferenças

estatisticamente significativas nos parâmetros supracitados. É de notar, adicionalmente, a falta de poder estatístico de muitos destes estudos.[14,29-32]

Existem, no entanto, alguns dados em vários artigos que parecem fazer uma apologia acérrima das qualidades da fibra de carbono, especialmente, no campo da amplitude de movimento em fraturas do úmero proximal. Estes estudos em conjunto chegam à conclusão que nos parâmetros avaliados- entre eles: Constant score, elevação anterior, elevação lateral e adução- este novo material é claramente superior.[30]

Adicionalmente, devido a uma maior resistência à fadiga apresentada por este material, as cavilhas intramedulares utilizadas poderão vir a exibir diâmetros menores. Estes menores diâmetros, as modificações morfológicas supramencionadas, podem em si ajudar num período de convalescença mais célere com a reunificação dos topos ósseos mais rápida. Esta abordagem de menores diâmetros não é possível com implantes metálicos devido às limitações impostas pela sua resistência à fadiga.[2]

Conclusão

Os implantes em fibra de carbono parecem ser bastante versáteis tanto nos tipos de fraturas nos quais podem ser utilizados como onde podem ser utilizados/fixados. Existem, assim, estudos que demonstram a eficácia destes implantes em vários tipos de fraturas nos membros inferiores como nos superiores, utilizando placas ou cavilhas. Devemos notar, contudo, como já foi dito anteriormente, que existe alguma falta de versatilidade intraoperatória, isto deve-se à rigidez do material e consequente impossibilidade de o dobrar, para assim o fazer adequar-se melhor à morfologia do doente. Por outro lado, algumas questões surgiram nos primórdios da utilização deste material, como a propensão para a quebra intraoperatória. Posto isto, parece que estas preocupações pertencem ao passado, pois hoje em dia não são relevantes. O consenso entre os vários estudos revistos é francamente positivo em relação à segurança e versatilidade deste material. Em nenhum estudo relativo a intervenções referentes a fraturas traumáticas ou patológicas se verificou um aumento nos eventos adversos como infeções ou desadequação do CFR PEEK como material de suporte de osso. Alguns estudos parecem até indiciar resultados mais positivos com a utilização deste material, contudo o universo amostral reduzido e um poder estatístico baixo não permitem retirar nenhuma conclusão final para já. A curto prazo este material parece ser pelo menos não inferior quanto ao seu desempenho na prática, não existiu nenhum tipo de falha catastrófica relatada na literatura revista, em relação aos materiais seus competidores. Da sua versatilidade pode-se afirmar a possibilidade da utilização deste novo material para vários tipos de construções como placas, parafusos, placas com pinos, rolamento ou unidade completa de múltiplos componentes. Mesmo como superfície de articulação o CFR PEEK parece ter algumas vantagens em termos de resistência e desgaste mesmo quando acoplado com outros materiais mais comummente usados.[33-35]

Nos vários estudos avaliados as taxas de união radiográfica, fraturas consolidadas são muito satisfatórias e em nenhuma forma inferiores às alternativas existentes, até um follow-up de 12 meses.[30,33] As taxas de não união parecem ser significativamente melhores do que os atuais 20% em implantes metálicos, devido a ajustes na morfologia das cavilhas. Assim, os resultados operatórios aparentam ser todos muito encorajadores, não só pelos seus bons desfechos, mas, também, pelas baixas taxas de complicações. As complicações parecem acontecer em número menor, quando

comparadas com implantes em aço inoxidável, embora seja necessário muito mais investigação para estabelecer estes dados como factos estabelecidos. Quanto às taxas de reoperação, estas parecem também serem menores, quando a fibra de carbono é usada, mas também este resultado precisa de mais investigação. São notáveis, também, as baixas taxas de infecção e consequentemente não-união derivada dessa complicação, contudo estas já são baixas mesmo nos seus equivalentes compostos por ligas metálicas, podendo chegar mesmo a 0%.[33] Aliado às vantagens que se prendem com imagiologia e radioterapia é possível perceber o sucesso e aumento da utilização e investigação sobre o CFR PEEK.

Com isto, é possível afirmar que a fibra de carbono pode vir a suplantar outros materiais no campo de fraturas em contexto de trauma, se alguns pequenos ajustes forem feitos, embora estes sejam, admitidamente, detalhes menores. Estes ajustes passariam por pequenos acertos no módulo de elasticidade e resistência à fadiga, ajudando ainda mais na regeneração da fratura em questão, ou mesmo na morfologia do implante, por um lado. Por outro lado, a colocação de elementos radiopacos no implante, para ajudar a determinar a posição e implantação do mesmo, seria benéfica.[2, 34]

Existe também, bastante aplicabilidade deste material noutras áreas relacionadas com a traumatologia, nomeadamente no respeitante às lesões ligamentares em contexto desportivo e traumático. Destarte, o PEEK tem vindo a implantar-se fortemente nestas áreas, onde as suas características físicas como a radiotransparência são consideradas vantagens. Este material é, então, utilizado na cirurgia de reparação da coifa dos rotadores e noutros casos como âncoras para suturas, alguns autores referem a possibilidade da utilização de CFR PEEK para melhorar o seu desempenho, aumentado a força e rigidez da âncora, levando a um produto mais versátil e a um procedimento mais expedito. [2, 34]

Assim, de acordo com os artigos analisados podem-se concluir vários pontos referentes ao uso de CFR PEEK em ortopedia, desde as suas características ao caminho a percorrer. Ao longo desta revisão narrativa são avaliadas várias facetas deste material desde a sua história e carreiro trilhado até aos dias de hoje e pelos blocos cirúrgicos adentro, revela-se, ainda, os aspetos mais promissores e os mais desapontantes. Já aqui foi dito sobre as propriedades físicas da fibra de carbono que aparentemente são bastantes favoráveis, contudo, propriedades físicas e teóricas favoráveis nem sempre são constatadas no mundo real. Como tal, torna-se necessária uma amálgama da produção científica recente referente a este tema.

Em primeiro lugar, quando nos debruçamos sobre a aplicabilidade da fibra de carbono na cirurgia ortopédica verificamos que é um material competente. Os implantes feitos deste material afiguram-se capazes de suportar cargas exercidas pelo doente no dia a dia e fazer face às necessidades que sobre eles recaem, proteger e fixar a fratura ou ponto de fragilidade. Para além disso, são hábeis a devolver a mobilidade perdida dos membros aquando do trauma.

Nos casos oncológicos, parece ser verdade que a radioluscência ajuda na monitorização e distribuição mais precisa de radioterapia, embora não tenham sido encontrados casos relatados nos quais esse facto se tenha traduzido num aumento de sobrevida do doente. Vários estudos referem benefícios na imagem obtida com TAC e a possibilidade de utilização de RMN, e mais, vários estudos referem uma dispersão de radiação muito inferior aos implantes metálicos, a radioluscência e densidade são muito semelhantes à do osso humano. Quanto ao benefício experienciado pelo doente, poucos estudos têm um seguimento substancial para lá da cirurgia. A falta de follow-up, a maioria dos estudos encontra-se entre os 6 e 12 meses, pode explicar a falta de conclusões quanto a melhorias de condições ou sobrevivência dos pacientes. Deve ser notada, também, o número de casos relativamente baixo nestes estudos, a maior parte destes apenas conta com números a rondar os 30

a 40 indivíduos. Devido a estes números baixos, torna-se difícil a obtenção de resultados com poder estatístico suficiente para se retirar grandes conclusões, um problema prevalente em muitos estudos.

No que concerne à vigilância radiológica e planeamento de radioterapia, é possível confirmar uma maior facilidade na vigilância radiológica do tumor, relatado por vários estudos. A possibilidade de uma melhor e maior vigilância é claramente um benefício para o doente e uma das vantagens mais óbvias deste material. Em relação ao planeamento de esquemas de radioterapia, existe pouco escrito sobre isto nos estudos analisados, no entanto, parece haver aqui uma grande vantagem, a diminuição da quantidade de radiação necessária e maior precisão na radiação emitida. Apesar destas vantagens, demonstrar e auferir os ganhos experimentados pelo doente são difíceis de quantificar com os follow-ups curtos exibidos.

Por outro lado, a fibra de carbono tem um efeito de isolamento térmico que resguarda o osso contra o efeito térmico da solidificação do cimento. Este facto ajuda com a proteção do doente da dor crónica que daqui pode resultar.

Em termos de funcionalidade o CFR PEEK cumpre todos os pré-requisitos, estes fazem tudo o que os implantes metálicos são capazes de fazer. Mesmo em fraturas patológicas ou pontos de fragilidade, quer seja no esqueleto axial ou apendicular, este material é capaz de prevenir desfecho indesejáveis em todos os tipos de ossos e neoplasias. A resistência à fadiga parece ser um ponto forte, apesar de não ser tão bom quanto publicitado inicialmente.

Ao longo desta revisão existem relances de uma possível superioridade do novo material, contudo, as informações não parecem ser consensuais. É de notar que os estudos que relatam uma superioridade estão, de facto, numa minoria, ainda que expressiva. Esta situação pode dever-se ao baixo poder estatístico atingido pela maior parte dos estudos, quando fazem comparações intra-coorte, como de resto já foi referido mais atrás. Apesar de tudo, a dúvida da superioridade do material continua a pairar, mesmo tendo apenas indícios e poucas conclusões definitivas sobre estes assuntos. Sobretudo a fibra de carbono é extremamente versátil e adequado para todo o tipo de implantes e como meio de fixação desses mesmos implantes. Até como superfície de articulação o CFR PEEK parece ser adequado, como referido por certos estudos mais focados nas próteses de articulações.

Por outro lado, durante esta revisão narrativa podemos constatar que existem alguns ajustes possíveis e benéficos ao material utilizado. Alguns ajustes em propriedades físicas, à forma dos implantes e algumas características que permitiriam o mais fácil manejo destas peças intraoperatoriamente. O treino e habituação das equipas cirúrgicas ao novo material deve ainda ser expandido, visto vários estudos o referirem como um aspecto menos positivo da recente adopção deste material. Várias vezes se nota a necessidade de aquisição de novas competências das equipas a estes implantes, algo que de qualquer das formas é completamente normal.

Em termos de perspetivas futuras, a investigação clínica deste material precisa de ser ampliada, tanto em termos de tempo como número de casos. Os profissionais de saúde beneficiariam de uma maior formação e familiarização com este material e das suas peculiaridades associadas. Todos estes desenvolvimentos potenciarão a capacidade de investigação referente à fibra de carbono e perceber os verdadeiros benefícios existentes aquando da sua utilização. Conclui-se então que ainda resta muita matéria para ser estudada no que concerne a este campo de investigação. A ortopedia encontra-se perante um material verdadeiramente fascinante e potencialmente impulsionador de melhores resultados, no entanto, pouco estudado neste momento.

Apêndice

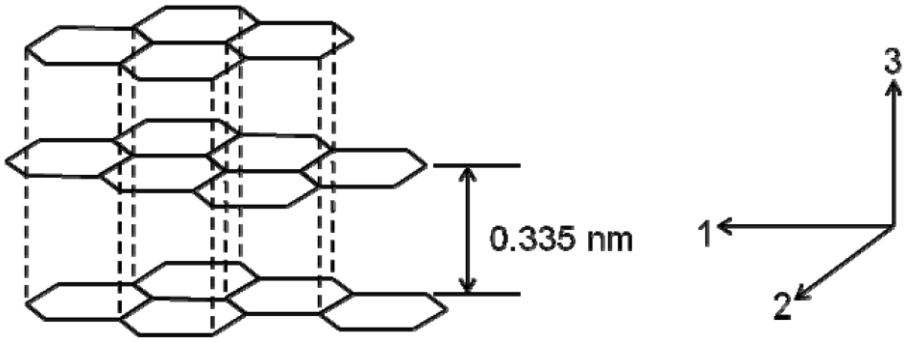


Figura 2 – Estrutura e orientação dos cristais de grafite. Adaptado de Huang X. Fabrication and Properties of Carbon Fibers.[4]

Materiais	**Módulo de Young** (GPa)	**Limite de resistência à tração** (MPa)	**Resistência flexional** (Nm)
Osso cortical humano	12-14	104-121	*
CFR PEEK	13-18	120	1.000**
Titânio (Ti-6Al-4V)	120	600	880**
Aço inoxidável 316L	200	580	750**

Tabela 2 – Comparação de propriedades físicas. Adaptado de Biomechanical properties (Internet).[6,7]

* - Varia consoante o osso

** - Executado em placas diafisárias de 4.5 mm

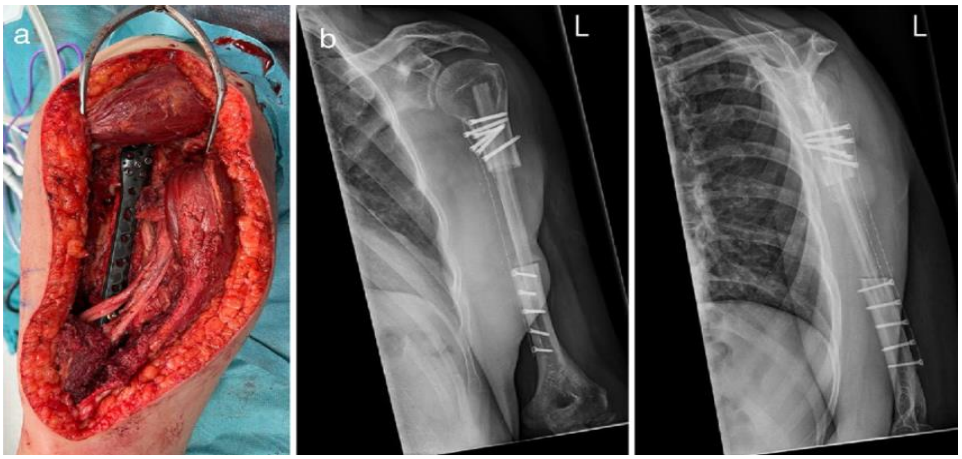


Figura 3 Implante de CFR PEEK após remoção de sarcoma de Ewing adaptado de Rijs Z, Weekhout A, Daniel S, et al. Carbon-fibre plates for traumatic and (impending) pathological fracture fixation: Where do we stand? A systematic review[14]

Bibliografia

1. Kim T, See CW, Li X, Zhu D. Orthopedic Implants and Devices for Bone Fractures and Defects: Past, Present and Perspective. *Engineered Regeneration*. 2020;1:6-18. doi: 10.1016/j.engreg.2020.05.003.
2. Hak DJ, Mauffrey C, Seligson D, Lindeque B. Use of carbon-fiber-reinforced composite implants in orthopedic surgery. *Orthopedics*. 2014 Dec;37(12):825-30. doi: 10.3928/01477447-20141124-05.
3. Chung D. Introduction to Carbon Fibers. *In*: Carbon Fiber Composites. 1ª ed. Newton: Butterworth-Heinemann; 1994.
4. Huang X. Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials*. 2009;2(4):2369-2403. doi: 10.3390/ma2042369.
5. Biomechanical properties (Internet). Herzeliya; Carbofix Orthopedics, disponível em https://www.carbo-fix.com/biomechanical-properties. Consultado pela última vez a 2025/05/23.
6. Theivendran K, Arshad F, Hanif UK, Reito A, Griffin X, Foote CJ. Carbon fibre reinforced PEEK versus traditional metallic implants for orthopaedic trauma surgery: A systematic review. *J Clin Orthop Trauma*. 2021;23:101674. doi: 10.1016/j.jcot.2021.101674.
7. Yeung CM, Bhashyam AR, Patel SS, Ortiz-Cruz E, Lozano-Calderón SA. Carbon Fiber Implants in Orthopaedic Oncology. *J Clin Med*. 2022;11(17):4959. doi: 10.3390/jcm11174959.
8. Petersen R. Carbon Fiber Biocompatibility for Implants. *Fibers*. 2016;4(1):1. doi: 10.3390/fib4010001.
9. Uri O, Folman Y, Laufer G, Behrbalk E. A novel spine fixation system made entirely of carbon-fiber-reinforced PEEK composite: An in vitro mechanical evaluation. *Adv Orthop*. 2020;2020:4796136. doi: 10.1155/2020/4796136
10. Ziran BH, O'Pry EK, Harris RM. Carbon fiber-reinforced PEEK versus titanium tibial intramedullary nailing: A preliminary analysis and results. *J Orthop Trauma*. 2020;34(8):429-433. doi: 10.1097/BOT.0000000000001756.
11. Carbon-Fiber International Collaboration Initiative Research Group. Complications of patients with bone tumors treated with carbon-fiber plates: An international multicenter study. *Sci Rep*. 2022;12:18969. doi: 10.1038/s41598-022-23519-9.
12. Borrelli S, Putame G, Audenino AL, Bignardi C, Ferro A, Marone S, Terzini M. Cross-link augmentation enhances CFR-PEEK short fixation in lumbar metastasis stabilization. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023;11:1114711. doi: 10.3389/fbioe.2023.1114711.
13. Pesare E, Meschini C, Caredda M, Messina F, Rovere G, Solarino G, Ziranu A. Carbon vs. Titanium Nails in the Treatment of Impending and Pathological Fractures: A Literature Review. *J Clin Med*. 2024;13(10):2940. doi: 10.3390/jcm13102940.
14. Rijs Z, Weekhout A, Daniel S, *et al.* Carbon-fibre plates for traumatic and (impending) pathological fracture fixation: Where do we stand? A systematic review. *J Orthop Traumatol*. 2023;24(1):42. doi: 10.1186/s10195-023-00724-4.
15. Long JR, Kalani MA, Goulding KA, et al. Carbon-fiber-reinforced polyetheretherketone orthopedic implants in musculoskeletal and spinal tumors: imaging and clinical features. *Skeletal Radiol*. 2023;52:393-404. doi: 10.1007/s00256-022-04069-7.

16. Clunk MJ, Gonzalez MR, Denwood HM, Werenski JO, Sodhi A, Hoffman BA, Merchan N, Lozano-Calderon SA. A PEEK into carbon fiber: A practical guide for high performance composite polymeric implants for orthopaedic oncology. *J Orthop*. 2023;45:13-18. doi: 10.1016/j.jor.2023.09.011.
17. Takayanagi A, Siddiqi I, Ghanchi H, Lischalk J, Vrionis F, Ratliff J, Bilsky M, Hariri OR. Radiolucent Carbon Fiber-Reinforced Implants for Treatment of Spinal Tumors—Clinical, Radiographic, and Dosimetric Considerations. *World Neurosurg*. 2021;152:61-70. doi: 10.1016/j.wneu.2021.05.100.
18. Delaney FT, Denton H, Dodds M, Kavanagh EC. Multimodal imaging of composite carbon fiber-based implants for orthopedic spinal fixation. *Skeletal Radiol*. 2021;50(5):1039-1045. doi: 10.1007/s00256-020-03622-6.
19. Perez-Roman RJ, Boddu JV, Bashti M, *et al*. The use of carbon fiber-reinforced instrumentation in patients with spinal oncologic tumors: A systematic review of literature and future directions. *World Neurosurg*. 2023;173:13-22. doi: 10.1016/j.wneu.2023.01.090.
20. Khan HA, Ber R, Neifert SN, *et al*. Carbon fiber-reinforced PEEK spinal implants for primary and metastatic spine tumors: a systematic review on implant complications and radiotherapy benefits. *J Neurosurg Spine*. 2023;39(4):534-547. doi: 10.3171/2023.5.SPINE23106.
21. Laux CJ, Hodel SM, Farshad M, et al. Carbon fibre/polyether ether ketone (CF/PEEK) implants in orthopaedic oncology. *World J Surg Onc*. 2018;16:241. doi: 10.1186/s12957-018-1545-9.
22. Laux CJ, Villefort C, Ehrbar S, Wilke L, Guckenberger M, Müller DA. Carbon fiber/polyether ether ketone (CF/PEEK) implants allow for more effective radiation in long bones. *Materials*. 2020;13(7):1754. doi: 10.3390/ma13071754.
23. Lozano-Calderon SA, Rijs Z, Groot OQ, et al. Outcomes of long bones treated with carbon-fiber nails for oncologic indications: international multi-institutional study. *J Am Acad Orthop Surg*. 2024;32(3):e134-e145. doi: 10.5435/JAAOS-D-22-01159.
24. Oliveira VCC, Fonseca EMM, Rua CC, Belinha J, Piloto PAG, Natal Jorge RM. Effect of two different bone cements in thermal necrosis when associated to titanium versus carbon nailing for bone metastases – a numerical study. *Int J Med Eng Inform*. 2021;13(5):405-421.
25. Pala E, Procura A, Trovarelli G, Berizzi A, Ruggieri P. Intramedullary nailing for impending or pathologic fracture of the long bone: titanium vs carbon fiber PEEK nailing. *EFORT Open Rev*. 2022;7(8):611-617. doi:10.1530/EOR-22-0001.
26. Piccioli A, Piana R, Lisanti M, et al. Carbon-fiber reinforced intramedullary nailing in musculoskeletal tumor surgery: a national multicentric experience of the Italian Orthopaedic Society (SIOT) Bone Metastasis Study Group. *Injury*. 2017;48(Suppl 3):S55-S59. doi:10.1016/S0020-1383(17)30659-9.
27. Kumar N, Ramakrishnan SA, Lopez KG, et al. Can Polyether Ether Ketone Dethrone Titanium as the Choice Implant Material for Metastatic Spine Tumor Surgery? *World Neurosurg*. 2021;148:94-109. doi:10.1016/j.wneu.2021.01.059. PMID: 33508491.
28. Zoccali C, Soriani A, Rossi B, et al. The Carbofix™ "Piccolo Proximal femur nail": A new perspective for treating proximal femur lesion. A technique report. *J Orthop.* 2016;13(4):343-346. doi:10.1016/j.jor.2016.07.001. PMID: 27436924; PMCID: PMC4939471.
29. Ziran BH, O'Pry EK, Harris RM, et al. Carbon Fiber-Reinforced PEEK Versus Titanium Tibial Intramedullary Nailing: A Preliminary Analysis and Results. *J Orthop Trauma*. 2020;34(8):429-433. doi:10.1097/BOT.0000000000001756. PMID: 32168062.

30. Song LM, Wang GX, Wang L, et al. Comparison between CFR-PEEK and titanium plate for proximal humeral fracture: A meta-analysis. *Jt Dis Relat Surg*. 2024;35(3):483-490. doi:10.52312/jdrs.2024.1611. PMID: 39189556; PMCID: PMC11411899.
31. Guzzini M, Lupariello D, Lanzetti RM, et al. Preliminary experience with triangular CarboFix "Piccolo" Distal Radius Plate in wrist fractures. Clinical and radiological results. *Acta Biomed*. 2018;90(1-S):61-66. doi:10.23750/abm.v90i1-S.7697. PMID: 30715000; PMCID: PMC6503389.
32. Mitchell PM, Lee AK, Collinge CA, et al. Early comparative outcomes of carbon fiber-reinforced polymer plate in the fixation of distal femur fractures. *J Orthop Trauma.* 2018;32(8):386-390. doi:10.1097/BOT.0000000000001223. PMID: 29781944.
33. Takashima K, Nakahara I, Uemura K, et al. Clinical outcomes of proximal femoral fractures treated with a novel carbon fiber-reinforced polyetheretherketone intramedullary nail. *Injury*. 2020 Mar;51(3):678-682. doi:10.1016/j.injury.2020.01.007. Epub 2020 Jan 8. PMID: 31959356.
34. Herzog LN, Traven SA, Walton ZJ, et al. The use of carbon fiber implants for impending or existing pathologic fractures. *J Orthop Trauma*. 2022 Jul;36(7):e260-e264. doi:10.1097/BOT.0000000000002320.
35. Li CS, Vannabouathong C, Sprague S, et al. The use of carbon-fiber-reinforced (CFR) PEEK material in orthopedic implants: a systematic review. *Clin Med Insights Arthritis Musculoskelet Disord*. 2015 Feb 23;8:33-45. doi:10.4137/CMAMD.S20354. PMID: 25780341; PMCID: PMC4344123.