

Melhorando a caracterização osteoarticular na ressonância magnética: o papel das sequências que simulam o contraste tecidual da tomografia computadorizada

Improving osteoarticular characterization in magnetic resonance imaging: the role of simulated computed tomography sequences

Gabriel Brito-Barbosa^{1,a}, Felipe Bortoloni Pires Correa^{1,b}, Leonor Garbin Savarese^{1,c}, Mateus Andrade Hernandez^{1,d}, Paulo Moraes Agnollitto^{1,e}, Marcelo Novelino Simão^{1,f}, Marcello Henrique Nogueira-Barbosa^{1,g}

1. Departamento de Imagens Médicas, Hematologia e Oncologia Clínica da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo (FMRP-USP), Ribeirão Preto, SP, Brasil.

Correspondência: Dr. Gabriel Brito-Barbosa. Departamento de Imagens Médicas, Hematologia e Oncologia Clínica – FMRP-USP, Hospital das Clínicas. Rua Tenente Catão Roxo, 3900, Vila Monte Alegre. Ribeirão Preto, SP, Brasil, 14051-140. E-mail: gabrielbrito11@gmail.com.

a. <https://orcid.org/0009-0004-0391-7989>; b. <https://orcid.org/0009-0009-1887-4893>; c. <https://orcid.org/0000-0002-1372-9162>; d. <https://orcid.org/0000-0002-2244-5532>; e. <https://orcid.org/0000-0003-1818-3266>; f. <https://orcid.org/0000-0002-2164-1910>; g. <https://orcid.org/0000-0002-7436-5315>.

Submetido em 21/5/2024. Revisado em 28/9/2024. Aceito em 28/10/2024.

Como citar este artigo:

Brilo-Barbosa G, Correa FBP, Savarese LG, Hernandez MA, Agnollitto PM, Simão MN, Nogueira-Barbosa MH. Melhorando a caracterização osteoarticular na ressonância magnética: o papel das sequências que simulam o contraste tecidual da tomografia computadorizada. Radiol Bras. 2025; 58:e20240048.

Resumo Aumentar o contraste tecidual nas imagens obtidas com a ressonância magnética para avaliação óssea tem sido o objetivo de vários estudos recentes e diversas técnicas têm sido propostas para este fim, incluindo sequências com tempo de eco ultracurto, tempo de eco zero, além de sequências com eco de gradiente, em variadas formas de aquisição. Neste artigo trazemos o uso da sequência FRACTURE (acrônimo do inglês para *fast field echo resembling a CT using restricted echo spacing*), que passamos a utilizar rotineiramente no nosso serviço. Esta técnica se baseia na aquisição de sequência gradiente eco com diferentes tempos de eco e pós-processamento específico. As sequências gradiente eco são amplamente disponíveis nos equipamentos de ressonância magnética, o que representa uma vantagem para esta sequência. Contudo, por ser mais suscetível a artefatos metálicos, é limitada em pacientes com implantes e dispositivos metálicos. O objetivo deste artigo é ilustrar o uso da sequência FRACTURE em diferentes contextos, incluindo, entre outros, infecção osteoarticular, artropatia inflamatória, tumores ósseos, fraturas e doenças de deposição de cristais.

Unitermos: Ressonância magnética; Tomografia computadorizada multidetectores; Osso e ossos; Articulações.

Abstract Increasing tissue contrast for bone assessment on magnetic resonance imaging has been the aim of several recent studies, and various techniques have been proposed for that purpose, including ultrashort echo time sequences, zero echo time sequences, and gradient echo sequences in various acquisition forms. In this article, we discuss the fast field echo resembling a computed tomography using restricted echo-spacing (FRACTURE) sequence, which we have started to use routinely in our practice. The FRACTURE sequences are based on the acquisition of gradient echo sequences with different echo times and specific postprocessing. Gradient echo sequences are widely available on magnetic resonance imaging scanners, which is an advantage for the use of a FRACTURE sequence. However, being more susceptible to metal artifacts, a FRACTURE sequence is of limited utility in patients with metallic implants or medical devices. The aim of this article is to illustrate the use of FRACTURE sequences in various contexts, including osteoarticular infection, inflammatory arthropathy, bone tumors, fractures, and crystal deposition diseases.

Keywords: Magnetic resonance imaging; Multidetector computed tomography; Bone and bones; Joints.

INTRODUÇÃO

O papel das sequências de ressonância magnética (RM) que simulam o contraste do tecido ósseo da tomografia computadorizada (TC) tem sido o objetivo de trabalhos recentes⁽¹⁻³⁾. A caracterização do tecido ósseo cortical e trabecular é um dos pontos fracos das imagens de RM, portanto, melhorar a capacidade em distinguir os diferentes contrastes ósseos é fundamental. Estas sequências têm o grande potencial de auxiliar no diagnóstico de doenças inflamatórias, neoplasias, trauma e variantes da

normalidade. São úteis na demonstração da fragmentação e reabsorção óssea, além da reação periosteal, o que facilita a identificação e o entendimento das deformidades e do complexo remodelamento ósseo. As principais sequências que simulam o contraste tecidual da TC (sCT) incluem a aquisição com tempo de eco (TE) ultracurto (UTE), sequências com TE zero (ZTE), eco de gradiente ponderada em efeito de suscetibilidade (SWI), uso do *deep learning* no gradiente Dixon multieco para aquisição de gradiente volumétrico (BoneMRI) e os gradientes volumétricos com

TEs curtos em fase *flip angles* também curtos, nomeados de 3D-Bone^(1,4-6).

Temos atualmente disponível a sequência *fast field echo resembling a CT using restricted echo spacing* (FRACTURE), uma sequência que é obtida mediante aquisição com sequência eco de gradiente com diferentes TEs e a seguir é utilizado pós-processamento. A primeira etapa do pós-processamento consiste da somação de todas as aquisições com diferentes TEs, o que produz uma imagem com alto sinal-ruído. Após a somação, a imagem do último pulso de eco é subtraída da imagem somada e o produto final sofre inversão da escala de cinza, o que produz uma imagem com contraste tecidual semelhante ao da TC⁽⁷⁾ (Figura 1).

A sequência FRACTURE pode ser adquirida em aparelhos de 1,5-T e 3,0-T e, como descrito, utiliza diferentes TEs que correspondem aos tempos da aquisição em fase para cada tipo de equipamento, sendo, respectivamente, 4,6 ms para 1,5-T e 2,3 ms para 3,0-T, com *voxels* isotrópicos de 0,62 mm para 1,5-T e 0,7 mm para 3,0-T, resultando em um tempo de aquisição de 4:56 para 1,5-T e 6:48 para 3,0-T⁽⁶⁾. Johnson et al. descreveram a aquisição em aparelhos de 3,0-T, com *field of view* de 160 × 160 mm⁽⁷⁾. Na nossa instituição, a sequência FRACTURE tem sido adquirida em equipamento de 1,5-T, com os parâmetros acima descritos.

No entanto, não adquirimos sequências volumétricas e as imagens são adquiridas com espessura de 3,5 mm e *gap* de 1,75 mm, com tempo de repetição de 30 ms e *flip angle* de 15°, resultando em um tempo de aquisição de 4:18, utilizando o ombro como exemplo.

Os benefícios da sequência FRACTURE incluem a sua disponibilidade, já que é baseada em sequências com eco de gradiente que estão disponíveis de forma ampla nos equipamentos de RM, a alta resolução espacial próxima à da TC com tempo de exame factível, o uso de pós-processamento mínimo e simples, a não utilização de radiação ionizante e, por fim, o potencial de realizar técnicas adicionais de pós-processamento quantitativas para fins de pesquisa⁽⁷⁾, como, por exemplo, o potencial de avaliar a microestrutura óssea e a quantificação da porosidade do osso como biomarcador de risco de fraturas e resposta ao tratamento em pacientes com osteoporose e osteopenia⁽⁸⁾.

Apesar dos benefícios descritos, a sequência FRACTURE apresenta forte suscetibilidade a artefatos metálicos. Outra limitação potencial é a suscetibilidade a artefatos de movimento. Estas limitações são mais evidentes na sequência FRACTURE do que em outras sequências sCT, como a UTE e a ZTE⁽⁶⁾.

As sequências que simulam o contraste tecidual da TC devem ser tornar realidade nos serviços de radiologia

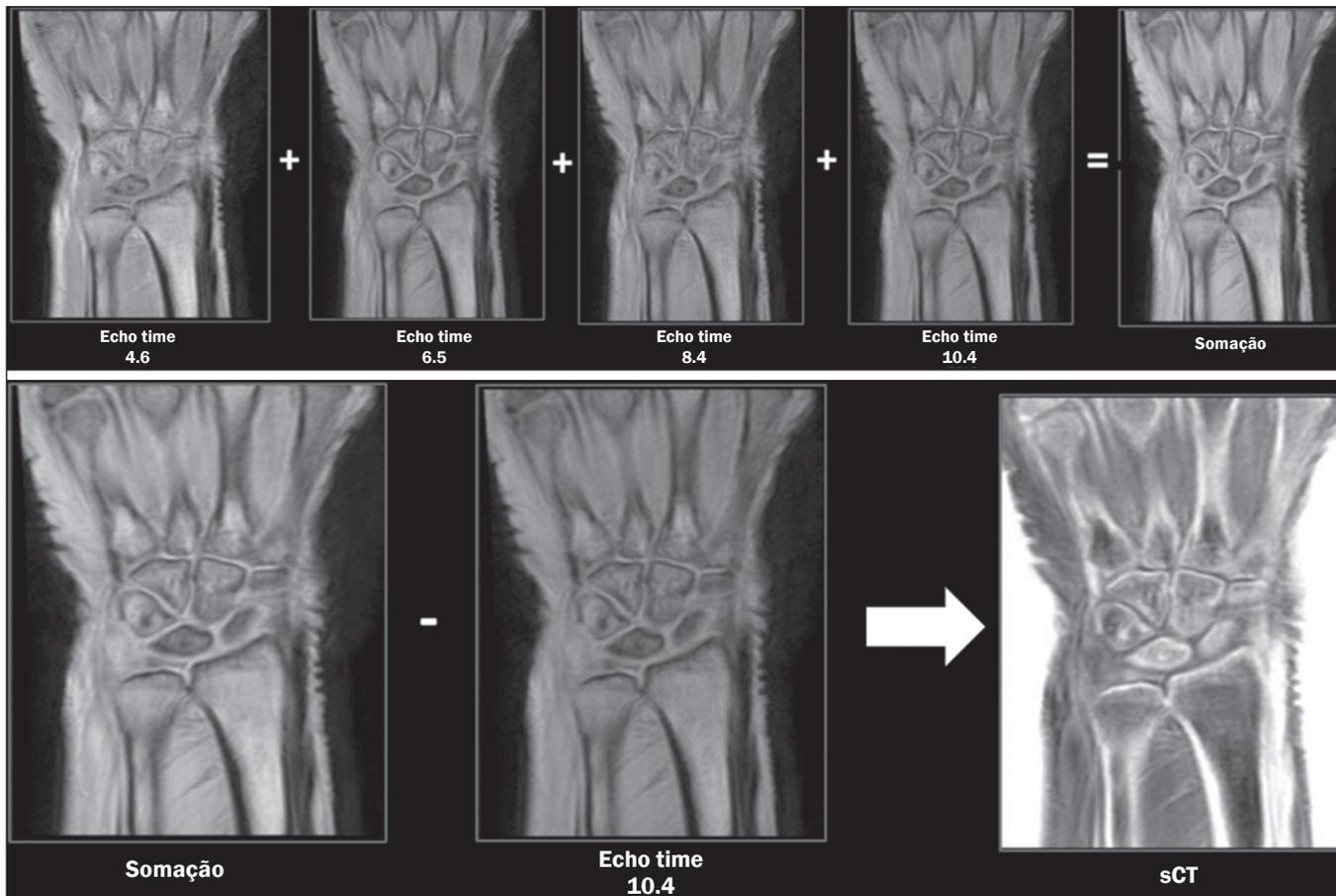


Figura 1. Técnica de aquisição da sequência FRACTURE em que diferentes TEs são obtidos e somados. O último TE é subtraído da somação para formar uma imagem em que a escala de cinza é invertida, para simular o contraste tecidual da TC.

musculoesquelética, e nosso objetivo, neste artigo, é ilustrar e discutir os benefícios deste tipo de contraste tecidual ósseo, em particular a utilidade da sequência FRACTURE, com base em casos clínicos da prática diária.

INFECÇÃO OSTEOARTICULAR

As sequências convencionais ponderadas em T1 e as sequências sensíveis a líquido são fundamentais para caracterização do processo infeccioso osteoarticular e periarticular, sendo o edema da medula óssea um preditor de acometimento ósseo. As sequências sCT podem ser úteis aumentando a conspicuidade do osso mineralizado trabecular e cortical, melhorando a identificação de deformidades, da esclerose óssea reacional, da reabsorção óssea e de fragmentação óssea crônica. Na osteomielite crônica, por exemplo, existem trabalhos que demonstram o papel das sequências ZTE para a melhor caracterização da cloaca e do sequestro na RM^(9,10). A Figura 2 ilustra um caso de artrite séptica e osteomielite no tornozelo, no qual a sequência FRACTURE complementou a avaliação pelas sequências tradicionais, facilitando a caracterização do remodelamento e da reabsorção óssea das superfícies articulares, a presença de osso reacional subcondral e a presença de fragmentação óssea crônica, alterações estas confirmadas por exame de TC.

ARTROPATIAS INFLAMATÓRIAS

A RM das articulações sacroilíacas é a modalidade de imagem de escolha para detectar sacroiliite em pacientes

com espondiloartrite⁽¹¹⁻¹³⁾. As imagens de RM são importantes para detectar inflamação ativa e também para caracterizar a presença de dano estrutural pós-inflamatório, como erosões ósseas, osteoesclerose subcondral e anquilose parcial ou completa⁽¹⁴⁾.

No nosso levantamento bibliográfico não identificamos estudos que tenham avaliado o papel da sequência FRACTURE especificamente nas artropatias inflamatórias. Porém, em um estudo com pacientes clinicamente suspeitos de apresentar sacroiliite inflamatória, Jans et al.⁽¹⁵⁾ compararam o desempenho da ponderação T1 convencional e da sequência sCT adquirida de maneira similar à sequência FRACTURE, por meio de pulsos de eco de gradiente multiteco, para a detecção de erosões, esclerose e anquilose das sacroilíacas. A diferença entre a sequência utilizada naquele estudo⁽¹⁵⁾ e a sequência FRACTURE é o pós-processamento, que, na sequência utilizada pelos autores foi realizado com técnica *deep learning* que permitia, inclusive, a mensuração da atenuação em Hounsfield nas imagens de sCT. Eles encontraram que a sequência sCT identificou acuradamente 94% das erosões, quando comparada aos 86% identificados nas imagens na ponderação T1 convencional que tem sido utilizada como a sequência de escolha para esta avaliação. A confiança interobservador e intraobservador foi comparável à da TC⁽¹⁵⁾.

No caso da artrite reumatoide, a RM também é utilizada para a avaliação da atividade da doença e dano estrutural, achados que podem ser objetivamente classificados pelo *rheumatoid arthritis magnetic resonance imaging*

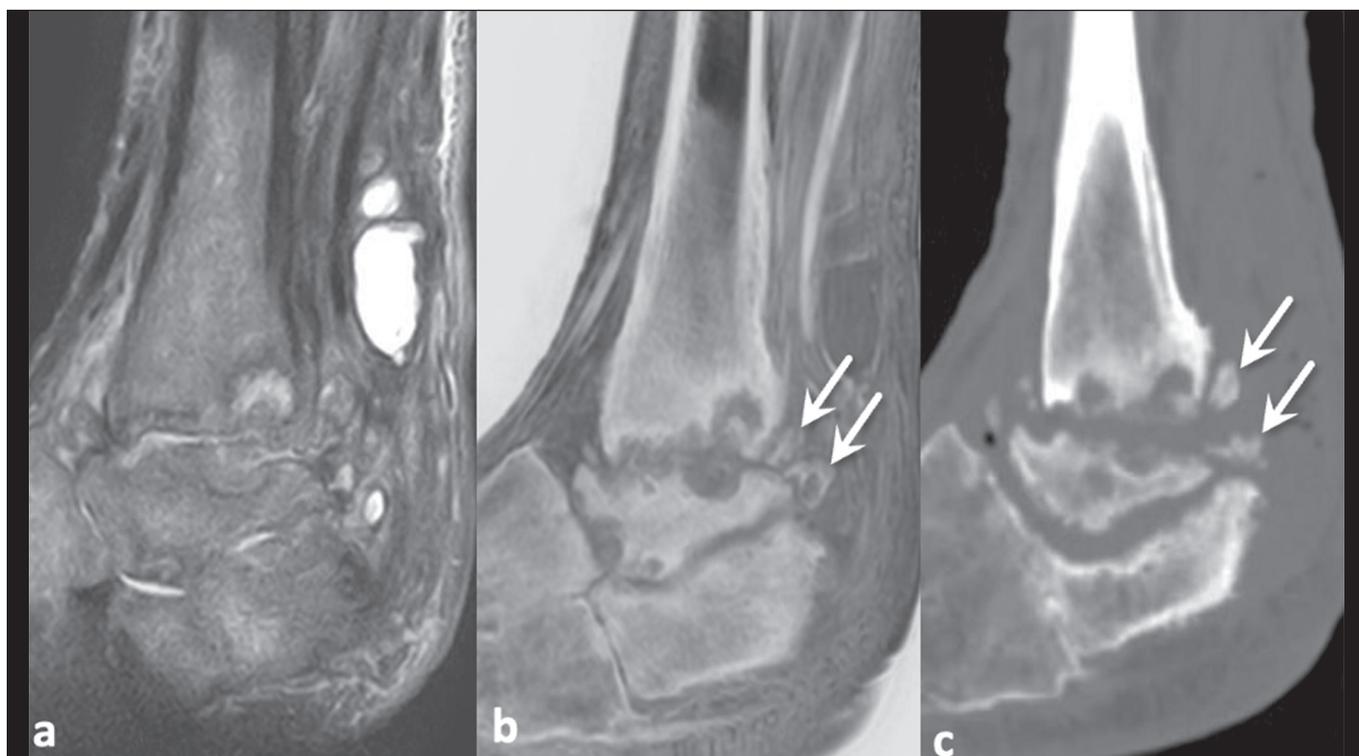


Figura 2. Homem, 63 anos, diabético, com artropatia neuropática e infecção. Imagens de RM ponderada em densidade de prótons com saturação de gordura (a) e de sequência FRACTURE (b). Pequenos fragmentos ósseos destacados não eram evidentes na sequência convencional de RM, que foi muito útil para identificar as extensas alterações inflamatórias, mas foram visualizados na sequência FRACTURE (b) e confirmados na TC em plano sagital (c) – setas.

scoring system (RAMRIS) proposto pelo grupo OMERACT⁽¹⁶⁾. A detecção de erosões na artrite reumatoide sabidamente é importante por contribuir para o diagnóstico e prognóstico⁽¹⁷⁾. Fica claro, portanto, que a detecção de erosões ósseas participa do cerne do diagnóstico das artropatias inflamatórias, e as sequências que simulam o contraste da TC têm forte potencial para contribuir na detecção dessas anormalidades (Figura 3)⁽¹⁴⁾.

TUMORES ÓSSEOS

O padrão de destruição óssea, a reação periosteal e os contornos da lesão são utilizados para prever o grau de agressividade de um tumor na radiologia convencional⁽¹⁸⁾. Adicionalmente, a caracterização do padrão de mineralização da matriz óssea pode auxiliar a prever a histologia⁽¹⁹⁾. Atualmente, a radiografia simples continua como modalidade de escolha para investigação inicial de tumores ósseos, recomendada pelo Colégio Americano de Radiologia⁽²⁰⁾. Gersing et al., em um estudo retrospectivo

com 32 pacientes, avaliaram a concordância entre radiografias simples e sequências de RM que simulam o contraste tecidual da TC em combinação com radiografias simuladas. Essas radiografias também eram derivadas das sequências volumétricas de RM adquiridas em aparelhos de 3,0-T, com pulsos de eco de gradiente T1 pós-processados. Os autores avaliaram o grau de agressividade dos tumores, incluindo padrão de destruição óssea e reação periosteal, e encontraram boa concordância entre a sequência sCT e as radiografias simples⁽²¹⁾. De modo semelhante, Xu et al. demonstraram comparabilidade entre os achados das sequências ZTE e a TC na avaliação de tumores ósseos⁽²²⁾. Do nosso conhecimento, ainda não há trabalhos publicados avaliando especificamente o papel da sequência FRACTURE nesse contexto. Adicionar sequências sCT aos protocolos de rotina para investigação de neoplasias ósseas pode se tornar fundamental para auxiliar na avaliação da agressividade, do padrão de acometimento e do estadiamento local (Figura 4).



Figura 3. Mulher de 42 anos com dor lombar suspeita para espondiloartrite axial. RM das sacroilíacas ponderada em T1 (a) mostra erosões múltiplas e coalescentes em associação com esclerose subcondral. As erosões ósseas (setas brancas) e irregularidade dos platôs vertebrais (setas pretas) são mais bem demonstradas na sequência FRACTURE (b), achados que foram confirmados pela TC (c).

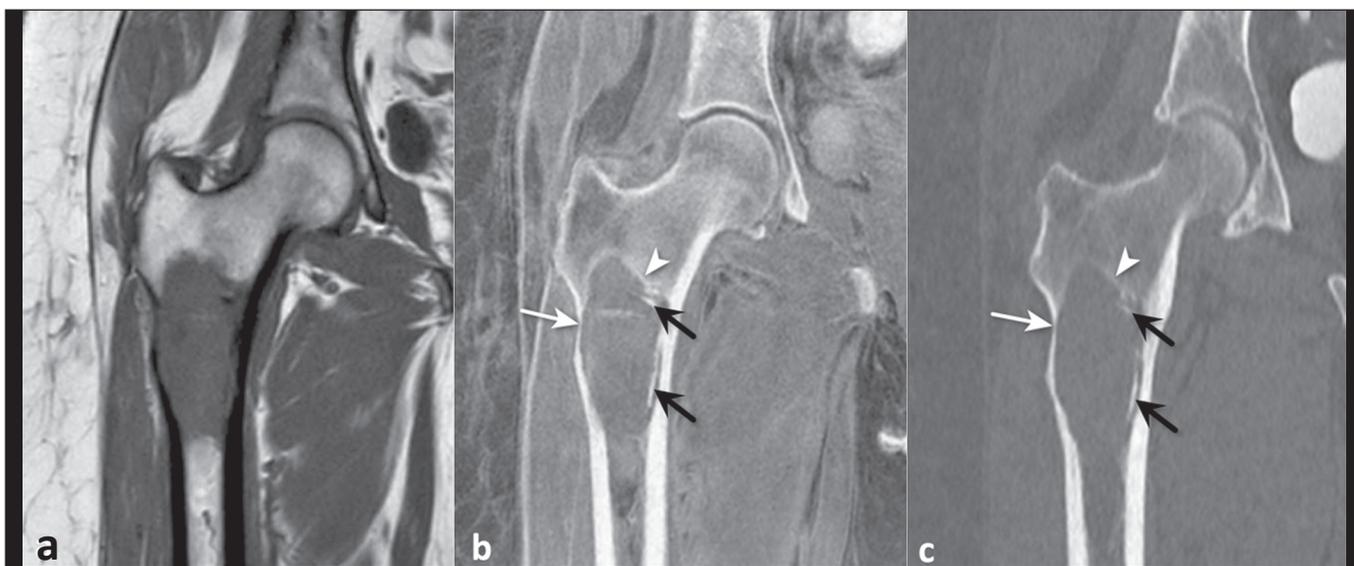


Figura 4. Mulher de 57 anos com lesão expansiva osteolítica na região subtrocantérica. A sequência FRACTURE (sCT - b) demonstrou melhor uma discreta reação óssea marginal (cabeça de seta), o recorte endosteal (seta branca) e pequenas áreas calcificadas no interior da lesão (setas pretas), na comparação com a ponderação T1 (a), em conformidade com a reformatação coronal da TC (c).

FRATURAS

A avaliação de traços e margens das fraturas ósseas é uma das principais vantagens das sequências sCT (Figura 5). No joelho, por exemplo, a sequência é capaz de identificar a fratura, e nos casos de avulsão do ligamento cruzado anterior, proporcionar acurada mensuração do fragmento avulsionado e do grau de retração, auxiliando no planejamento cirúrgico⁽²¹⁾.

As fraturas da coluna vertebral e do quadril aumentam o risco de mortalidade de cinco a dez anos após o evento, respectivamente, o que torna sua identificação de fundamental importância. Em estudo com 30 pacientes, pesquisadores avaliaram o desempenho de sequências sCT, em particular a sequência tridimensional T1 gradiente eco (T1SGRE), e a sequência UTE e identificaram boa concordância dessas sequências em comparação à TC convencional na detecção de fraturas e alterações degenerativas da coluna vertebral, em particular a sequência T1SGRE, que se mostrou mais robusta que a UTE, apresentando sensibilidade, especificidade e acurácia superiores para a detecção de fraturas⁽²³⁾. Segundo os autores, na sequência T1SGRE as fraturas da coluna vertebral poderiam ser medidas e agrupadas em concordância com os principais sistemas de classificação disponíveis, sendo as medidas dessa sequência praticamente idênticas às da TC convencional.

No contexto do trauma cranioencefálico por projéteis de arma de fogo, Gascho et al. encontraram equivalência dos achados de dano ósseo e fraturas entre a TC e a sequência FRACTURE, com um desempenho superior às sequências convencionais da RM⁽²⁴⁾. Já nos casos de luxação do ombro com lesão de Hill-Sachs (Figura 5), um desafio que se impõe é a mensuração do defeito ósseo, que usualmente apresenta um curso oblíquo que não segue o trajeto dos planos de aquisição da RM. Neste aspecto, Cui

et al. encontraram um desempenho equivalente entre a sequência FRACTURE volumétrica e a TC na quantificação da perda óssea, bem como na mensuração dos parâmetros morfológicos do ombro⁽²⁵⁾. Estudo recente avaliou o papel das sequências sCT no contexto do trauma no ombro avaliando o desempenho de diferentes técnicas que simulam o contraste tecidual da TC utilizando TC convencional como padrão de referência. O desempenho da sequência volumétrica ponderada em T1 gradiente eco, a sequência UTE e a sequência FRACTURE apresentaram acurácia semelhante para identificação da perda óssea da glenoide na lesão óssea de Bankart⁽²⁶⁾.

DOENÇAS DE DEPÓSITO DE CRISTAIS

As doenças de depósito de cristais são comuns, sobretudo na população idosa^(27,28). Apesar de assintomáticas em alguns casos, podem eventualmente se tornar sintomáticas e motivo de preocupação. Os depósitos mais comuns incluem os cristais de pirofosfato de cálcio di-hidratados, de hidroxiapatita de cálcio e de monourato de sódio, esta última conhecida como gota. Com relação à hidroxiapatita de cálcio, a deposição é predominantemente periarticular em tendões e bursas, sendo fonte de periartrite inflamatória, sobretudo quando na fase reabsortiva⁽²⁹⁾.

No contexto da hidroxiapatita de cálcio, o ombro é a articulação mais acometida (Figura 6), seguida pelo quadril. Tendinopatia calcificada do manguito rotador tem uma prevalência estimada em 6,8% a 54,0% dos pacientes com dor no ombro^(30,31). Em 2015, Nörenberg et al. publicaram um estudo mostrando que a adição de sequências ponderadas em SWI para o protocolo de rotina do ombro aumentou a detecção das calcificações por RM, utilizando a radiografia simples como padrão de referência⁽³²⁾. Na doença por depósito de pirofosfato de cálcio os cristais de pirofosfato de cálcio di-hidratados podem ocorrer nas

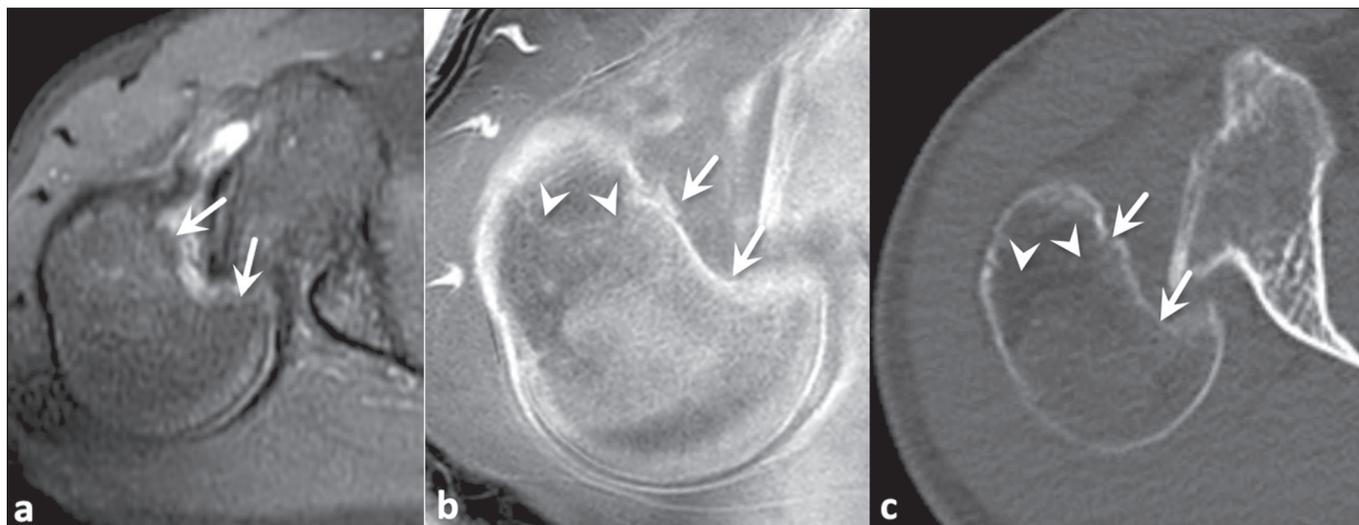


Figura 5. Homem de 19 anos com subluxação posterior crônica do ombro direito e fratura impactada crônica da cabeça umeral. A lesão de Hill-Sachs reversa (setas) foi bem demonstrada nas diferentes sequências, incluindo a ponderação em densidade de prótons com saturação de gordura (a). No entanto, a sequência FRACTURE (b) permite melhor avaliação do tecido ósseo cortical na fratura impactada da cabeça umeral (cabeças de seta em b e c), por suas características de cronicidade e ausência de edema ósseo, achado confirmado na TC (c).

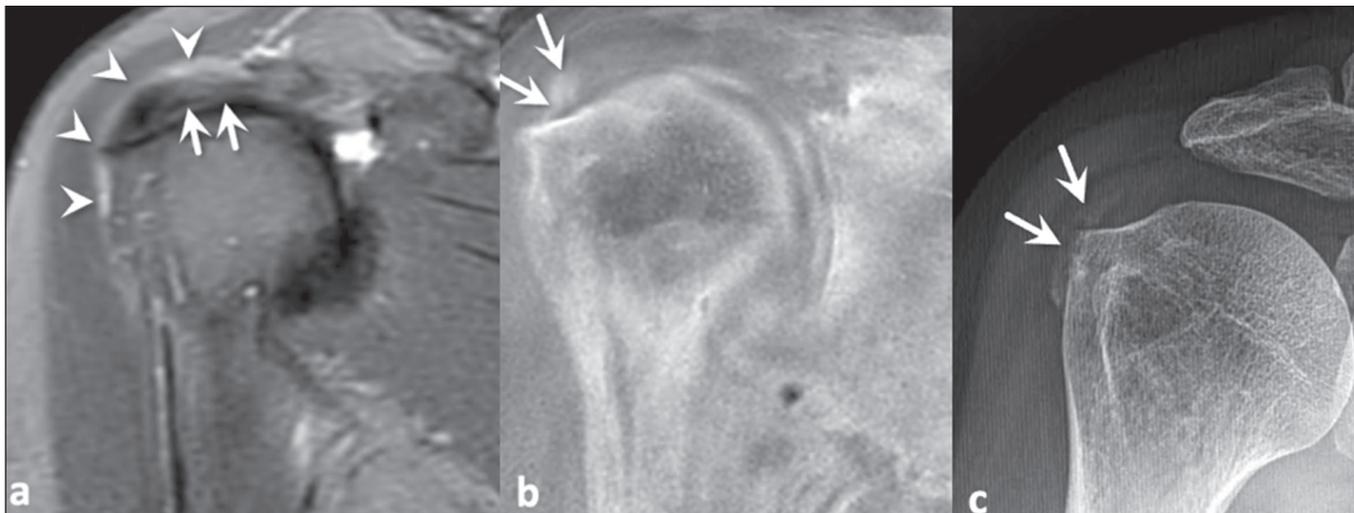


Figura 6. Mulher de 49 anos com queixa de dor intensa no ombro. Sequência convencional de RM ponderada em T2 com saturação de gordura (a) mostrando tendinopatia do supraespal (setas) e bursite subacromial subdeltóidea (cabeças de setas). Uma das principais causas de dor no ombro são calcificações decorrentes de doenças de depósito de cristais e, nas sequências convencionais, essas calcificações apresentam baixo sinal e podem não ser identificadas adequadamente, como neste caso. A sequência FRACTURE mostrou foco suspeito para calcificação (setas em b), confirmado na radiografia simples (setas em c).

cartilagens (condrocalcinose) e nas fibrocartilagens, como os meniscos. Em 2019, Finkenstaedt et al. apresentaram resultados em que sequências UTE eram capazes de demonstrar depósitos de cristais de pirofosfato de cálcio nos meniscos que, de maneira preliminar, se concentravam majoritariamente nas zonas avasculares⁽³³⁾. A sequência ZTE é útil para demonstrar as erosões em saca-bocado e os focos calcificados nos tofos gotosos, mas o benefício dessas sequências ainda não está totalmente claro nesse contexto⁽⁹⁾.

BENEFÍCIOS DA SEQUÊNCIA FRACTURE EM OUTROS CONTEXTOS

A sequência FRACTURE se mostra útil para caracterização de erosões nas superfícies articulares, na identificação da esclerose óssea da osteíte e da hiperostose óssea na síndrome SAPHO (Figura 7). Esses achados são im-

portantes para caracterizar a doença e complementam a capacidade das sequências de rotina, que demonstram o edema ósseo e a sinovite.

Nas partes moles, calcificações presentes em tumores como os condromas (Figura 8) podem ser bem visualizadas nas imagens da sequência FRACTURE, assim como as ossificações heterotópicas, incluindo as de origem neurogênica (Figura 9), que representam uma das complicações ortopédicas mais frequentes no contexto de lesões da medula espinal⁽³⁴⁾.

As lesões osteocondrais representam defeitos da cartilagem articular e do osso subcondral. Diferentes classificações foram propostas, mas todas concordam que o grau mais avançado é quando o fragmento ósseo se encontra destacado, apresentando implicações práticas no tratamento^(35,36), achado que pode ser bem apreciado na sequência FRACTURE (Figura 10). Também, os achados

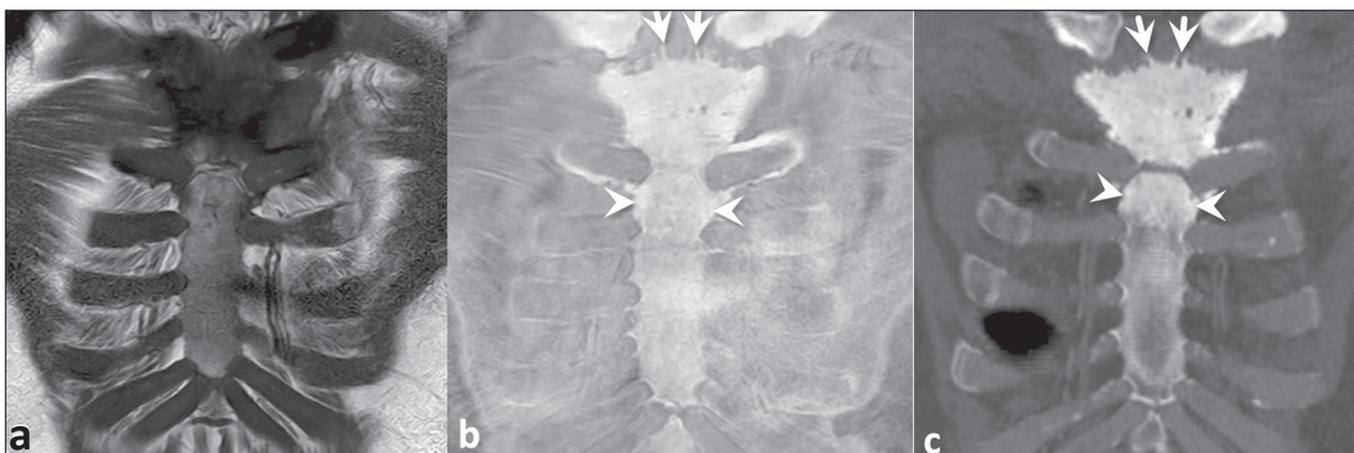


Figura 7. Homem, 56 anos, com síndrome SAPHO. Na sequência ponderada em T1 da RM (a) é possível identificar marcado baixo sinal adjacente às articulações esternoclaviculares, indicando a presença de osteíte. A sequência FRACTURE (b) fornece maiores detalhes sobre as irregularidades ósseas com formação de pequenas áreas de hiperostose, achado confirmado na imagem de TC (c - setas). É possível identificar, também, a osteoesclerose no manúbrio externo, mais evidente na sequência FRACTURE em comparação com a ponderação T1 convencional (cabeças de setas em b e c).

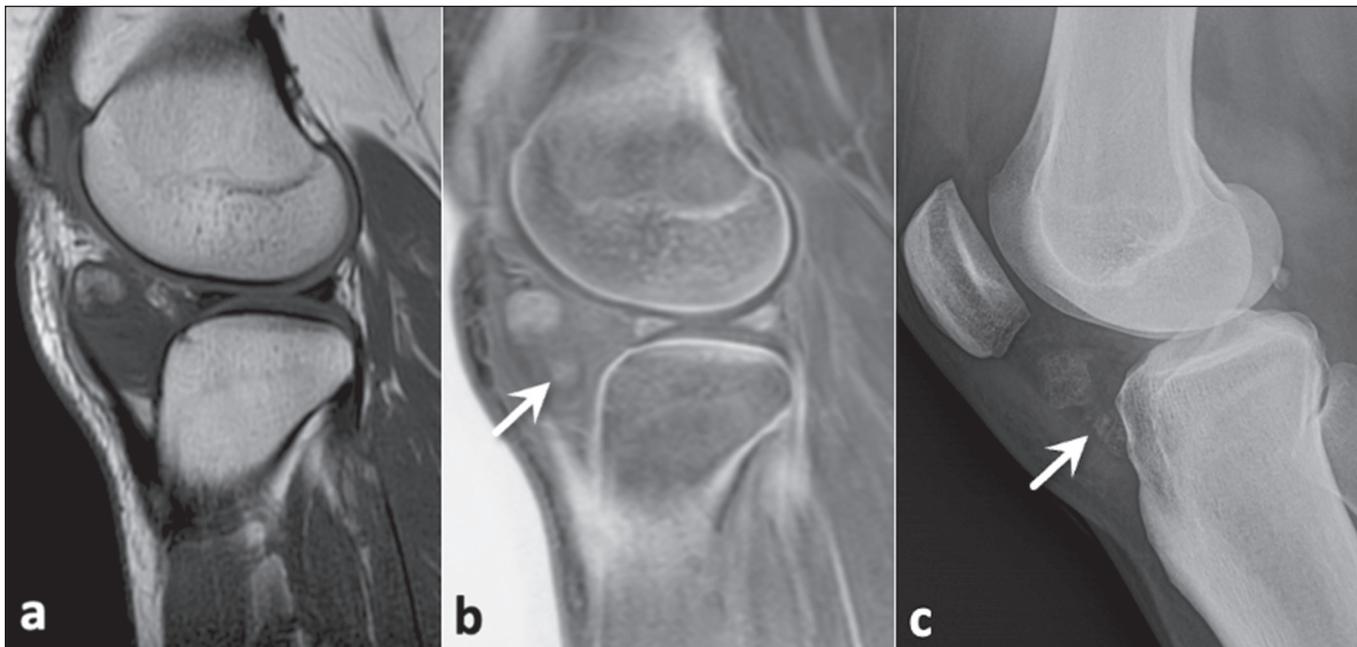


Figura 8. Mulher de 39 anos com condroma na gordura de Hoffa (infrapatelar) confirmado por histopatologia. As ossificações do condroma (setas) são mais bem identificadas na sequência FRACTURE (b) quando comparada com a sequência convencional de RM (a). A radiografia simples (c) confirma a presença das áreas de ossificação no interior da lesão.

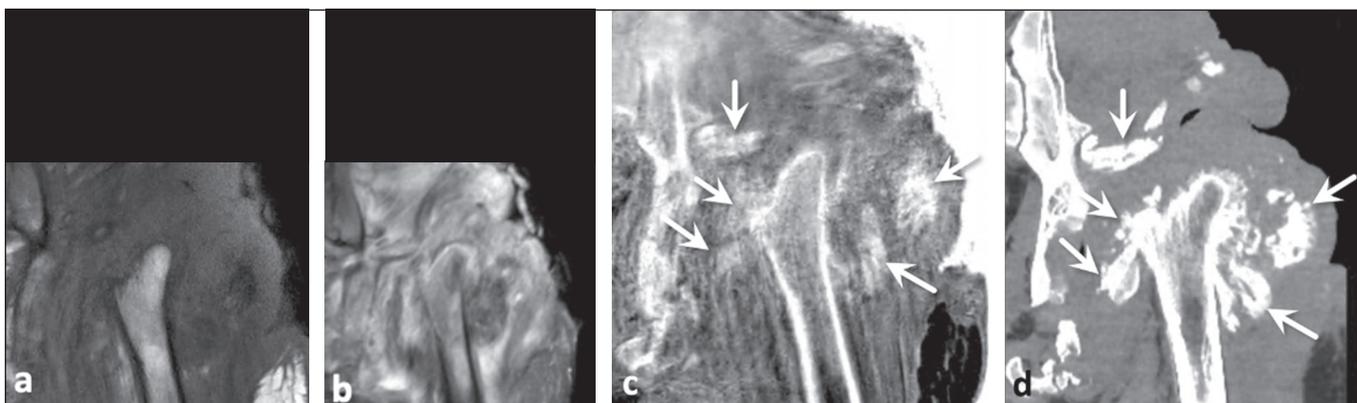


Figura 9. Homem de 29 anos com ossificações heterotópicas neurogênicas decorrentes de lesão da medula espinhal. Alterações inflamatórias ou infecciosas das partes moles periarticulares do quadril esquerdo são mais bem visualizadas nas sequências convencionais de RM ponderadas em T1 (a) e STIR (b). No entanto, as ossificações crônicas heterotópicas dos tecidos moles (setas) foram mais bem demonstradas na sequência FRACTURE (c), achado confirmado na TC (d).



Figura 10. Mulher de 25 anos com lesão osteocondral no tálus. A imagem de RM com ponderação em T1 (a) é capaz de identificar um fragmento instável destacado no dômus talar. Já a sequência FRACTURE (b) identifica com maior clareza o fragmento ósseo (seta), achado confirmado posteriormente na TC (c).

da necrose avascular da cabeça femoral e da doença de Legg-Calvé-Perthes, como a esclerose óssea, a remodelação e a fragmentação óssea, tendem a ser mais conspícuos na sequência FRACTURE (Figura 11). Nos casos

de coalizão óssea (Figura 12), a sequência FRACTURE permite identificar adequadamente a fusão óssea e auxilia na diferenciação dos tipos de coalizão.

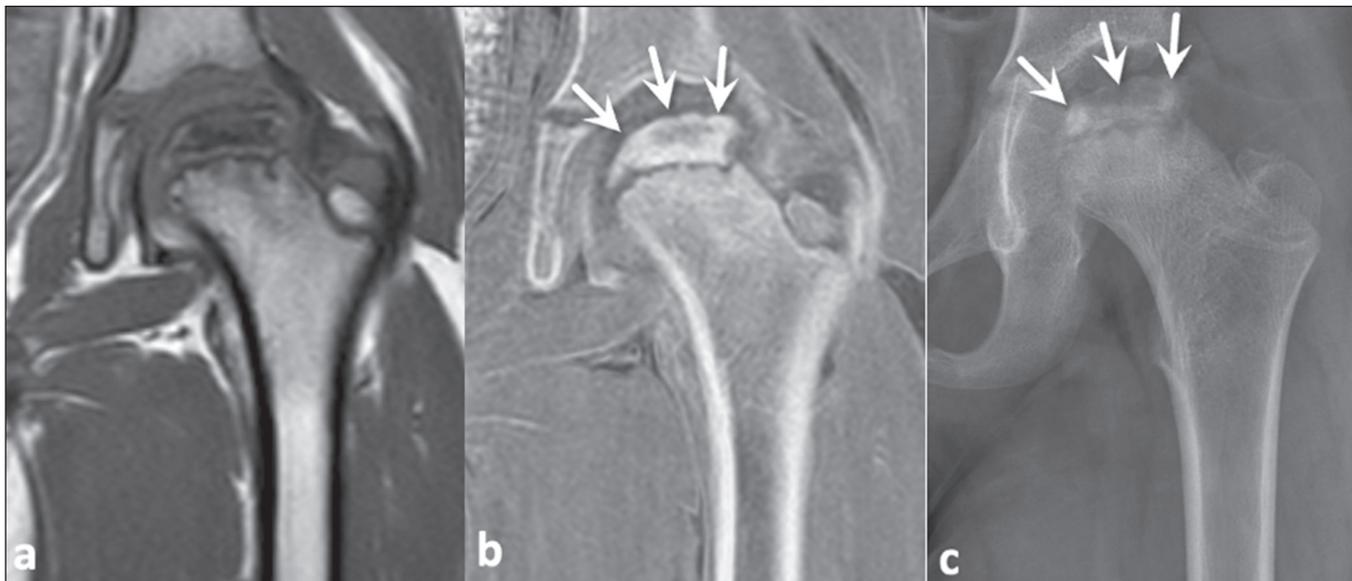


Figura 11. Menino de oito anos com doença de Legg-Calvé-Perthes. As imagens de RM ponderadas em T1 (a), da sequência FRACTURE (b) e da radiografia simples (c) são capazes de identificar a necrose avascular da cabeça femoral caracterizada por reabsorção, fragmentação e esclerose óssea na epífise femoral (setas). No entanto, o achado é mais visível na sequência FRACTURE e na radiografia simples.

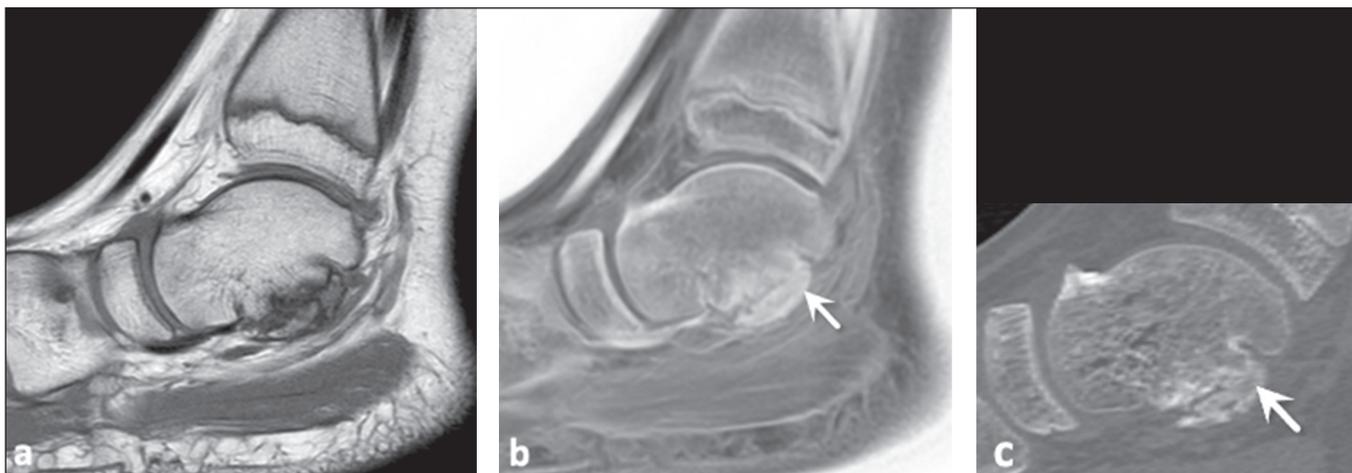


Figura 12. Menino de 12 anos com coalizão talocalcânea. A RM convencional ponderada em T1 (a) é capaz de demonstrar as irregularidades ósseas na articulação subtalar, sem indícios de pontes ósseas, sugerindo coalizão fibrosa. No entanto, na sequência FRACTURE (b) e na imagem de TC reformatada para o plano sagital (c) foram identificadas pontes ósseas compatíveis com barra óssea talocalcânea (setas).

CONCLUSÃO

As sequências sCT têm se mostrado benéficas na avaliação dos tecidos osteoarticulares em diferentes contextos clínicos. Conforme nosso objetivo, ilustramos diferentes situações em que a sequência FRACTURE trouxe informações adicionais que complementaram as informações das sequências de rotina, achados confirmados na correlação com radiografias ou com imagens de TC. No entanto, ressaltamos que os estudos sobre as sequências sCT ainda são relativamente escassos, em particular quando procuramos estudos que comparam o desempenho diagnóstico dos diferentes tipos de sequência sCT.

REFERÊNCIAS

1. Staartjes VE, Seevinck PR, Vandertop WP, et al. Magnetic resonance imaging-based synthetic computed tomography of the lumbar spine for surgical planning: a clinical proof-of-concept. *Neurosurg Focus*. 2021;50:E13.
2. Feuerriegel GC, Kopp FK, Pfeiffer D, et al. Evaluation of MR-derived simulated CT-like images and simulated radiographs compared to conventional radiography in patients with shoulder pain: a proof-of-concept study. *BMC Musculoskelet Disord*. 2022;23:122.
3. Weiger M, Wu M, Wurnig MC, et al. ZTE imaging with long-T2 suppression. *NMR Biomed*. 2015;28:247–54.
4. Sudol-Szopińska I, Giraudo C, Oei EHG, et al. Imaging update in inflammatory arthritis. *J Clin Orthop Trauma*. 2021;20:101491.
5. Engström M, McKinnon G, Cozzini C, et al. In-phase zero TE musculoskeletal imaging. *Magn Reson Med*. 2020;83:195–202.
6. Chong LR, Lee K, Sim FY. 3D MRI with CT-like bone contrast – an overview of current approaches and practical implementation. *Eur J Radiol*. 2021;143:109915.
7. Johnson B, Alizai H, Dempsey M. Fast field echo resembling a CT using restricted echo-spacing (FRACTURE): a novel MRI technique with superior bone contrast. *Skeletal Radiol*. 2021;50:1705–13.

8. Chang G, Boone S, Martel D, et al. MRI assessment of bone structure and microarchitecture. *J Magn Reson Imaging*. 2017;46:323–37.
9. Aydingöz Ü, Yıldız AE, Ergen FB. Zero echo time musculoskeletal MRI: technique, optimization, applications, and pitfalls. *Radiographics*. 2022;42:1398–414.
10. Aydingoz U. Imaging osteomyelitis: an update. *Rofo*. 2023;195:297–308.
11. Rudwaleit M, Jurik AG, Hermann KGA, et al. Defining active sacroiliitis on magnetic resonance imaging (MRI) for classification of axial spondyloarthritis: a consensual approach by the ASAS/OMERACT MRI group. *Ann Rheum Dis*. 2009;68:1520–7.
12. Lambert RGW, Bakker PAC, van der Heijde D, et al. Defining active sacroiliitis on MRI for classification of axial spondyloarthritis: update by the ASAS MRI working group. *Ann Rheum Dis*. 2016;75:1958–63.
13. Diekhoff T, Lambert R, Hermann KG. MRI in axial spondyloarthritis: understanding an 'ASAS-positive MRI' and the ASAS classification criteria. *Skeletal Radiol*. 2022;51:1721–30.
14. Ulas ST, Ziegeler K, Richter ST, et al. CT-like images in MRI improve specificity of erosion detection in patients with hand arthritis: a diagnostic accuracy study with CT as standard of reference. *RMD Open*. 2022;8:e002089.
15. Jans LBO, Chen M, Elewaut D, et al. MRI-based synthetic CT in the detection of structural lesions in patients with suspected sacroiliitis: comparison with MRI. *Radiology*. 2021;298:343–9.
16. Østergaard M, Peterfy CG, Bird P, et al. The OMERACT rheumatoid arthritis magnetic resonance imaging (MRI) scoring system: updated recommendations by the OMERACT MRI in Arthritis Working Group. *J Rheumatol*. 2017;44:1706–12.
17. Tavares Junior WC, Rolim R, Kakehasi AM. Imagens de ressonância magnética na artrite reumatoide. *Rev Bras Reumatol*. 2011;51:629–41.
18. Errani C, Tsukamoto S, Mavrogenis AF. Imaging analyses of bone tumors. *JBJS Rev*. 2020;8:e0077.
19. Costelloe CM, Madewell JE. An approach to undiagnosed bone tumors. *Semin Ultrasound CT MR*. 2021;42:114–22.
20. Expert Panel on Musculoskeletal Imaging; Bestic JM, Wessell DE, Beaman FD, et al. ACR Appropriateness Criteria® Primary Bone Tumors. *J Am Coll Radiol*. 2020;17(5S):S226–S238.
21. Gersing AS, Pfeiffer D, Kopp FK, et al. Evaluation of MR-derived CT-like images and simulated radiographs compared to conventional radiography in patients with benign and malignant bone tumors. *Eur Radiol*. 2019;29:13–21.
22. Xu Y, Shi L, Li N, et al. Value of zero echo time MR imaging and CT in diagnosis of bone destructions of bone tumors and tumor-like lesions. *Chin J Acad Radiol*. 2020;3:108–14.
23. Schwaiger BJ, Schneider C, Kronthaler S, et al. CT-like images based on T1 spoiled gradient-echo and ultra-short echo time MRI sequences for the assessment of vertebral fractures and degenerative bone changes of the spine. *Eur Radiol*. 2021;31:4680–9.
24. Gascho D, Zoelch N, Tappero C, et al. FRACTURE MRI: Optimized 3D multi-echo in-phase sequence for bone damage assessment in craniocerebral gunshot injuries. *Diagn Interv Imaging*. 2020;101:611–5.
25. Cui DD, Long Y, Yan Y, et al. Three-dimensional magnetic resonance imaging fast field echo resembling a CT using restricted echo-spacing sequence is equivalent to three-dimensional computed tomography in quantifying bone loss and measuring shoulder morphology in patients with shoulder dislocation. *Arthroscopy*. 2024;40:1777–88.
26. Feuerriegel GC, Kronthaler S, Weiss K, et al. Assessment of glenoid bone loss and other osseous shoulder pathologies comparing MR-based CT-like images with conventional CT. *Eur Radiol*. 2023;33:8617–26.
27. Resnik CS, Resnick D. Crystal deposition disease. *Semin Arthritis Rheum*. 1983;12:390–403.
28. Becce F, Viry A, Stamp LK, et al. Winds of change in imaging of calcium crystal deposition diseases. *Joint Bone Spine*. 2019;86:665–8.
29. Reijnierse M, Schwabl C, Klauser A. Imaging of crystal disorders: calcium pyrophosphate dihydrate crystal deposition disease, calcium hydroxyapatite crystal deposition disease and gout pathophysiology, imaging, and diagnosis. *Radiol Clin North Am*. 2022;60:641–56.
30. de Witte PB, Selten JW, Navas A, et al. Calcific tendinitis of the rotator cuff: a randomized controlled trial of ultrasound-guided needling and lavage versus subacromial corticosteroids. *Am J Sports Med*. 2013;41:1665–73.
31. Speed CA, Hazleman BL. Calcific tendinitis of the shoulder. *N Engl J Med*. 1999;340:1582–4.
32. Nörenberg D, Ebersberger HU, Walter T, et al. Diagnosis of calcific tendonitis of the rotator cuff by using susceptibility-weighted MR imaging. *Radiology*. 2016;278:475–84.
33. Finkenstaedt T, Biswas R, Abeydeera NA, et al. Ultrashort time to echo magnetic resonance evaluation of calcium pyrophosphate crystal deposition in human menisci. *Invest Radiol*. 2019;54:349–55.
34. Boutin RD, Resnick D. The SAPHO syndrome: an evolving concept for unifying several idiopathic disorders of bone and skin. *AJR Am J Roentgenol*. 1998;170:585–91.
35. Zagarella A, Impellizzeri E, Maiolino R, et al. Pelvic heterotopic ossification: when CT comes to the aid of MR imaging. *Insights Imaging*. 2013;4:595–603.
36. Laffenêtre O. Osteochondral lesions of the talus: current concept. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2010;96:554–66.

