

ANÁLISE FRACTAL COMO FERRAMENTA ADJUVANTE NA AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE IMPLANTES DENTÁRIOS

Fractal analysis as an adjuvant tool in the evaluation of dental implants stability

Access this article online	
Quick Response Code:	Website: https://periodicos.uff.br/ijosd/article/view/68054
	

Autores:

Daniel Adrian Silva Souza

Mestre em Odontologia e Saúde. Programa de Pós-graduação em Odontologia e Saúde. Universidade Federal da Bahia (FOUFBA), Salvador, Bahia, Brasil.

danieladrian.doc@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3332-2156

Frederico Sampaio Neves

PhD Doutor em Radiologia Odontológica. Programa de Pós-Graduação em Radiologia Odontológica. Universidade Estadual de Campinas (FOP/UNICAMP). Piracicaba, São Paulo, Brasil.

fredsampaio@yahoo.com.br

ORCID: 0000-0001-9178-707X

Paulo César Pinheiro Feitosa

MSc Mestre em Prótese Dentária. Universidade de Taubaté. Taubaté, São Paulo, Brasil.

pcpfeitosa@gmail.com

ORCID: 0009-0006-6916-1197

Instituição na qual o trabalho foi realizado: Universidade Federal da Bahia.

Endereço para correspondência: Daniel Adrian Silva Souza Faculdade de Odontologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil, Av. Araújo Pinho, 62 - Canela, Salvador - BA, 40110-150, Salvador, Bahia, Brazil.

E-mail para correspondência: danieladrian.doc@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo revisar a literatura quanto ao uso da análise fractal como método auxiliar na avaliação da estabilidade de implantes dentários em exames de imagem. Para tal, foi realizada uma revisão integrativa seguindo a diretriz PRISMA 2020. A estratégia de busca utilizou a abordagem PECO, incluindo estudos com pacientes normorreativos submetidos à cirurgia de implantes dentários, avaliados por exames de imagem usando Dimensão Fractal para medir a estabilidade do implante. As bases *PubMed*, *BVS*, *Web of Science*, *Scopus*, *Embase* e *Google Scholar* foram consultadas, com busca atualizada em abril de 2024. Foram incluídos estudos transversais, longitudinais, coortes, caso-controle e ensaios clínicos randomizados, sem restrições de idioma ou data. A análise revelou que a Dimensão Fractal pode ser uma ferramenta útil na avaliação da estabilidade de implantes dentários, especialmente quando combinada com métodos convencionais. No entanto, a variabilidade metodológica entre os estudos indica a necessidade de mais pesquisas com desenhos robustos.

Palavras-chave: Implantes Dentários; Diagnóstico por Imagem; Fractais.

ABSTRACT

The present study aimed to review the literature on the use of fractal analysis as an auxiliary method for assessing the stability of dental implants through imaging examinations. To achieve this, an integrative review was conducted following the PRISMA 2020 guidelines. The search strategy was based on the PECO framework and included studies involving normoreactive patients who underwent dental implant surgery, assessed through imaging exams using Fractal Dimension to measure implant stability. The databases PubMed, BVS, Web of Science, Scopus, Embase, and Google Scholar were consulted, with the search updated in April 2024. Cross-sectional, longitudinal, cohort, case-control, and randomized clinical trials were included, with no restrictions on language or publication date. The analysis revealed that Fractal Dimension may be a useful tool in evaluating dental implant stability, particularly when combined with conventional methods. However, methodological variability among studies highlights the need for further research with more robust designs.

Keywords: Dental Implants; Diagnostic Imaging; Fractals.

INTRODUÇÃO

A avaliação radiográfica é uma etapa essencial no diagnóstico de tecidos peri-implantares para avaliar o sucesso ou fracasso a longo prazo de reabilitações com implantes dentários (KARTHIK et al., 2013). A estabilidade primária refere-se ao suporte mecânico do implante no osso e à ausência de qualquer micromovimento, conhecida como estabilidade mecânica, enquanto a estabilidade secundária é considerada bem-sucedida quando há osteointegração do implante com o osso circundante, conhecida como estabilidade biológica (MEREDITH, 1998; SENNERBY & MEREDITH, 2008). A osteointegração é o resultado da estabilidade mecânica inicial complementada pela estabilidade biológica; a soma destes dois parâmetros dará o valor da estabilidade final (PRASHANTI et al., 2011).

Existem vários métodos auxiliares para avaliação da estabilidade de implantes dentários já consolidados na literatura e amplamente utilizados, são eles, o coeficiente de estabilidade do implante (CEI), realizado por meio da análise de frequência de ressonância (AFR) (XING, et al., 2015), o Periotest (AL-JETAILY & AL-DOSARI, 2011), a avaliação do torque de inserção (XING, et al., 2015) e o teste de percussão (ZANETTI et al., 2018). No entanto, estes métodos não são capazes de evidenciar informações pertinentes de possíveis alterações que ocorram no trabeculado ósseo durante a osseointegração dos implantes (SATWALEKAR et al., 2015). Visando contornar esse fato, métodos como a análise da dimensão fractal começaram a ser estudados, aplicados e amplamente explorados na odontologia.

A análise fractal (AF) é um método matemático pelo qual estruturas biológicas irregulares e complexas podem ser analisadas. O resultado deste método é definido como a dimensão fractal (DF). O termo "fractal" é derivado do latim "*fractus*", que significa "fraturado" ou "quebrado". O método fractal difere da geometria tradicional e pode ser empregado para avaliar formas semelhantes em diferentes escalas. Na odontologia, o objetivo principal dos métodos de AF é avaliar o padrão ósseo dos maxilares e a forma como a arquitetura trabecular é formada, através da avaliação de exames de imagem. Essa ferramenta quantitativa permite ao cirurgião-dentista prever a qualidade do tecido ósseo, ou seja, a densidade mineral óssea em uma determinada região de interesse (KATO et al., 2020; SENER et al., 2015).

Para a realização da AF é necessário utilizar um software específico para auxiliar na preparação e padronização da imagem. O software de domínio público utilizado é o ImageJ (disponível em <https://imagej.nih.gov/ij/>). Após a aquisição das imagens em alta resolução, são feitos cortes nos limites desejados das

regiões de interesse (ROI) (Fig. 1A), então a duplicação dos ROIs e a remoção de variações em grande escala no brilho são realizadas com um filtro Gaussiano desfocado (sigma = 35 pixels, tamanho do kernel = 33×33) (Fig. 1B). A partir desse momento, deve-se subtrair o ROI da imagem original, adicionando 128 valores de cinza para cada localização de pixel (Fig. 1C). Consequente a essa etapa, a imagem resultante passa por processos de binarização, erosão, dilatação, inversão e esqueletização (Fig. 1D e 1E), até estar adequada para a aplicação do método de análise (WHITE & RUDOLPH, 1999).

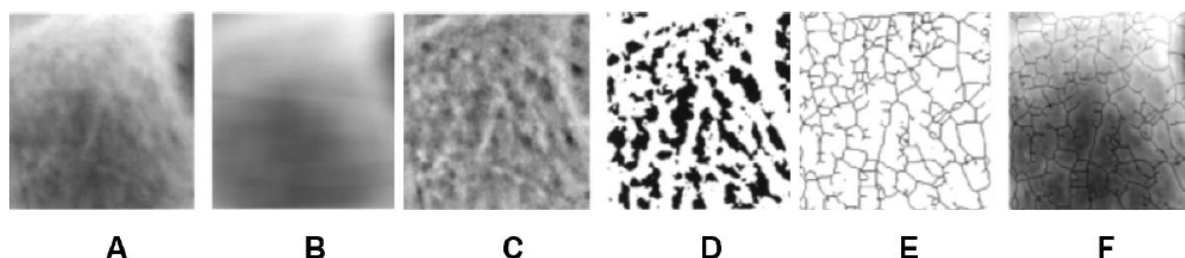


Figura 1. A: ROI do osso trabecular de uma radiografia digitalizada. B: Desfoque a região. C: Subtração e adição de 128 valores de cinza. D: Binarização. E: Esqueletização. F: Sobreposição de imagens (WHITE & RUDOLPH, 1999).

Após a preparação da imagem, alguns métodos de AF, como densidade espectral de potência, área de superfície de prisma triangular, método de manta e escala de intensidade de diferença ou o variograma podem ser utilizados (BOROWSKA et al., 2015). O algoritmo de contagem de caixas “box-counting”, considerado facilmente acessível, foi o método mais utilizado em análises odontológicas (LEITE et al., 2015; SUER et al., 2016). Dentre os métodos de descrição morfológica da arquitetura trabecular, a AF é uma ferramenta matemática que permite ao radiologista prever a qualidade da microarquitetura óssea através de uma análise quantitativa precisa (SUER et al., 2016).

Existe ainda uma relação pouco clara entre a estabilidade primária do implante e a qualidade do osso adjacente. De todos os métodos disponíveis descritos na literatura, a AFR seria o equivalente ao padrão-ouro na avaliação da estabilidade. No entanto, há evidências fracas para apoiar a relação entre a estabilidade do implante e a conformação do trabeculado ósseo (HUANG et al., 2020). Fica evidente, portanto, a necessidade de ponderar métodos adjuvantes para prever a estabilidade do implante previamente a intervenção cirúrgica, bem como avaliar a estabilidade do implante durante o processo de osseointegração, além de quantificar as alterações simultâneas à remodelação óssea. Assim, como método alternativo, a análise fractal poderia ser utilizada para avaliar quantitativamente as alterações trabeculares do tecido ósseo.

O presente trabalho teve como objetivo revisar a literatura quanto ao uso da análise fractal como método auxiliar na avaliação da estabilidade de implantes dentários em exames de imagem.

MATERIAL E MÉTODOS

Protocolo

Este estudo seguiu a versão mais recente da diretriz *Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis (PRISMA)*, que foi atualizada em 2020 (PAGE et al., 2021).

Desenho do estudo e questão de pesquisa

A seguinte questão de pesquisa foi abordada por meio de uma revisão integrativa:

“O uso da análise fractal pré-operatória, intraoperatória e/ou pós-operatória pode servir como indicador adjuvante da estabilidade de implantes dentários?”

Na estratégia de busca baseada na sigla PECO, foi utilizado vocabulário controlado (termos *MeSH* e *Emtree*) e palavras-chave livres:

População (P): Pacientes normorreativos submetidos a cirurgia de implantes dentários avaliados por exames de imagem.

Exposição (E): Uso da Dimensão Fractal na avaliação do trabeculado ósseo para medir a estabilidade de implantes dentários.

Comparação ou controle (C): Métodos de avaliação convencionais, outros métodos de avaliação adjuvantes ou a ausência de avaliação.

Desfecho (O): Medida da estabilidade do implante em relação à alteração na formação óssea adjacente ao mesmo.

Truncamentos e combinações de palavras-chave apropriadas foram selecionadas e adaptadas para cada busca de acordo com o vocabulário controlado de cada base de dados (Anexo 1).

A base de dados *PubMed* foi inicialmente acessada para identificar os termos de busca e desenvolver um algoritmo que pudesse ser adaptado a outras

plataformas eletrônicas (anexo 1). A lista de referências selecionadas foi armazenada como arquivos de dados específicos para cada banco de dados.

Crêterios de elegibilidade

Desenhos de estudos transversais, longitudinais, coortes, caso-controle e ensaios clínicos randomizados foram escolhidos como critérios de inclusão. Não houve restrições quanto idioma, data de publicação, sexo ou idade dos indivíduos avaliados.

Os estudos foram excluídos se infringissem pelo menos um dos seguintes critérios:

- 1) estudos cadavéricos;
- 2) estudos experimentais em animais;
- 3) estudos indisponíveis para leitura na íntegra ou ausência de resumo na plataforma da busca;
- 4) desenho inadequado (relatos de caso, revisões da literatura, resenhas, cartas ao editor, opiniões pessoais dos autores, capítulos de livros e resumos de congressos).

Fontes de informação e estratégia de busca

As bases de dados *PubMed*, *Biblioteca Virtual em Saúde*, *Web of Science*, *Scopus* e *Embase* foram utilizadas como fontes primárias de busca. Já a *Google Scholar* foi utilizada como fonte secundária, para tal, as 10 primeiras páginas da busca foram consultadas buscando abranger os artigos mais relevantes presentes na literatura cinzenta. Em abril de 2024, as buscas foram atualizadas. Limites de tempo não foram impostos.

O anexo 1 cont m as estratégias de busca detalhadas para todas as bases de dados eletrônicas. A lista de referências escolhidas foi salva em arquivos específicos de cada base de dados.

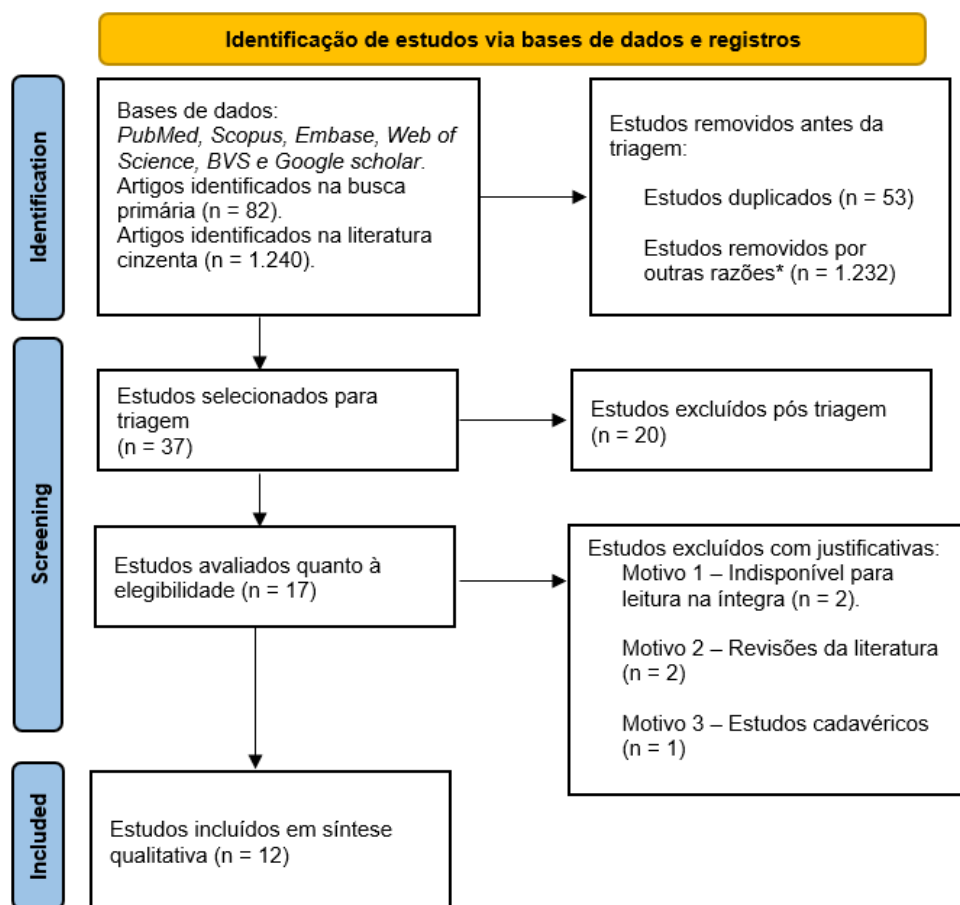


Figura 2: Fluxograma baseado no PRISMA 2020 para novas revisões sistemáticas que incluíram pesquisas apenas em bases de dados e registros

RESULTADOS

A Figura 1 apresenta um fluxograma delineando a identificação dos estudos, processo de inclusão e exclusão. Inicialmente, foram selecionados oitenta e dois estudos. Destes, cinquenta e três foram considerados duplicatas e removidos. A literatura cinzenta foi consultada, e oito estudos foram considerados relevantes. Os 37 estudos restantes foram submetidos a triagem inicial mediante leitura de títulos e resumos, vinte estudos foram excluídos nessa etapa. Os dezessete estudos recuperados da seleção primária foram submetidos a uma revisão de texto completo. Essa etapa resultou na exclusão de cinco estudos. Por fim, doze estudos foram incluídos em síntese qualitativa. A Tabela 1 resume os dados relacionados as características gerais dos estudos.

AUTOR/ ANO	DESENHO DO ESTUDO	DESCRIÇÃO DA AMOSTRA	INTERVENÇÃO	COMPARAÇÃO/ CONTROLE	RESULTADOS
Abdulhameed et al. (2018)	Clínico Randomizado Duplo-cego	11 pacientes por grupo (intervenção e controle), com 1º ou 2º molares ausentes, faixa etária entre 20 e 40 anos (média de 33 anos). Todos receberam implantes em região edêntula de pré-molares maxilares. As avaliações foram realizadas imediatamente após a colocação do implante, após 3 e 6 meses.	Análise da DF em imagens radiográficas digitais periapicais usando o método de box-counting	AFR utilizando o Osstell Mentor para medir o CEI.	DF excelente na mesial e distal para predição da estabilidade, e curva ROC > 0,8. O grupo intervenção apresentou um aumento significativo no CEI em comparação ao grupo controle após 6 meses.
Kangva nsurakit et al. (2017)	Transversal de Correlação	33 pacientes (21 mulheres e 12 homens) com idade média de 57 anos. Todos receberam implantes em maxila ou mandíbula com diferentes tamanhos e diâmetros. As avaliações foram realizadas até 6 meses antes da medição do CEI no momento da colocação do implante.	Análise da DF em imagens TCFC das regiões mesial e distal usando o método box-counting.	AFR para medir o CEI.	O valor do CEI foi afetado pelo diâmetro do implante e pela região de implantação, mas não houve correlação significativa com a DF.
Soler-Alcaraz et al. (2013)	Longitudinal Retrospectivo Duplo-Cego	25 pacientes por grupo (50 no total), com idade média de 54 anos (faixa etária de 30 a 72 anos). G1: Implantes com perfuração convencional (800 rpm). G2: Implantes com perfuração em baixa velocidade (50 rpm). As avaliações foram realizadas na fase pré-instalação e pós-carga protética.	Análise da DF em imagens TCFC e radiografias panorâmicas usando o método box-counting com algoritmo aprimorado nas fases pré e pós-operatória.	Não se aplica	A DF apresentou aumento significativo nas imagens pré e pós-operatórias em ambos os grupos, não havendo diferenças estatísticas entre si. A técnica de perfuração não influenciou no trabeculado ósseo pós-integração.
Mu et al. (2013)	Longitudinal Retrospectivo	48 pacientes (23 homens e 25 mulheres) com faixa etária entre 33 e 77 anos (média de 58 anos). Todos receberam implantes em maxila ou mandíbula, cirurgia realizada em dois estágios. As avaliações foram realizadas imediatamente e um ano após o carregamento funcional.	A DF foi calculada a partir de radiografias periapicais usando o método box-counting.	Não se aplica	A dimensão fractal média aumentou significativamente após 12 meses de carregamento.
Karadag & Yilmaz (2022)	Longitudinal Retrospectivo	14 pacientes (9 mulheres e 5 homens), com idade entre 33 e 75 anos (média de 58 anos). Todos os pacientes receberam implantes na região de pré-molares ou molares inferiores.	A DF foi analisada nas regiões mesial, distal e apical dos implantes a partir de radiografias	Não se aplica.	Houve um aumento significativo na DF nas regiões mesial, distal e apical 3 meses após a colocação dos implantes.

		As avaliações foram realizadas antes da cirurgia de implante e 3 meses após.	panorâmicas digitais.		
Öztürk & Kış (2022)	Longitudinal Retrospectivo	20 pacientes com idade média de 53 anos, receberam um total de 100 implantes (57 na mandíbula e 43 na maxila) através da técnica cirúrgica em dois estágios. As avaliações foram realizadas imediatamente após a inserção dos implantes e no terceiro mês após a reabertura.	A DF foi analisada no terço coronal, médio e apical dos implantes a partir de radiografias panorâmicas digitais.	AFR utilizando o Osstell Mentor para medir o CEI.	Os valores de DF e CEI foram significativamente maiores na mandíbula e em pacientes do sexo masculino. O valor de corte para DF apresentou sensibilidade de 93,4% e especificidade de 83,3% para a decisão de carga protética.
Kulczyk et al. (2018)	Transversal de Correlação	32 pacientes com idades não especificadas, receberam 50 implantes dentários de dois estágios em maxila e mandíbula. As avaliações foram realizadas imediatamente após a instalação dos implantes.	A DF foi analisada no terço coronal, médio e apical dos implantes a partir de radiografias periapicais digitais.	AFR utilizando o Osstell Mentor para medir o CEI.	A DF foi maior na maxila em comparação com a mandíbula. Já a média do CEI foi significativamente maior na mandíbula em comparação com a maxila. A correlação entre DF e CEI foi observada apenas no terço coronal de implantes em maxila.
Lee et al. (2011)	Clínico transversal	22 pacientes (14 homens e 8 mulheres), com idades entre 22 e 67 anos, receberam um total de 52 implantes dentários na maxila e mandíbula. As avaliações foram realizadas antes da cirurgia de instalação do implante e imediatamente após.	A DF foi calculada a partir de radiografias panorâmicas digitais usando o método box-counting .	AFR utilizando o Osstell Mentor para medir o CEI.	A correlação entre DF e CEI foi significativa e positiva, especialmente na mandíbula, enquanto na maxila a correlação foi menor e não significativa.
Onem et al. (2012)	Longitudinal Retrospectivo	21 pacientes (15 homens e 6 mulheres) com idade entre 27 e 43 anos (média de 36,9 anos). Todos os pacientes possuíam dois implantes não carregados na região de pré-molares ou molares da mandíbula em um dos lados, e ao menos um pré-molar ou molar no lado contralateral.	A DF foi analisada no terço coronal, médio e apical dos implantes a partir de radiografias panorâmicas digitais.	A DF foi analisada nas mesmas regiões ao redor dos dentes contralaterais.	Não houve diferenças significativas entre os valores médios de DF para as regiões ao redor dos dentes em comparação com as áreas peri-implantares.

		As avaliações foram realizadas aproximadamente 9,4 semanas após a colocação dos implantes.			
Sansare et al. (2012)	Longitudinal Retrospectivo	33 pacientes (20 homens e 13 mulheres) com idades entre 25 e 71 anos (média de 55 anos). 50 implantes foram instalados nas regiões posteriores de maxila e mandíbula, utilizando o protocolo cirúrgico de dois estágios.	A DF foi calculada na área distal ao implante a partir de radiografias panorâmicas digitais usando o método box-counting.	Não se aplica.	A DF média aumentou significativamente ao comparar os valores pré e pós implante, tanto para maxila quanto para mandíbula.
		As avaliações foram realizadas antes da cirurgia e imediatamente após.			
Suer et al. (2016)	Longitudinal Retrospectivo	30 pacientes (11 mulheres e 19 homens) com idade média de 42 anos receberam implantes na região de pré-molares e molares da mandíbula.	A DF foi calculada na área periimplantar a partir de radiografias panorâmicas digitais usando o método box-counting.	O torque de inserção foi medido durante a colocação dos implantes e o CEI foi avaliado com o dispositivo Osstell Mentor.	Houve correlações lineares positivas significativas entre DF e TI ($p = 0,0005$) e entre DF e CEI ($p = 0,0059$), sugerindo que a DF pode prever a estabilidade inicial do implante.
		As avaliações foram realizadas antes da cirurgia e imediatamente após.			
Tözüm et al. (2016)	Longitudinal Retrospectivo	82 pacientes (58 mulheres e 24 homens) com idade média de 46 anos receberam implantes dentários na região de pré-molares e molares mandibulares.	A DF foi calculada na área periimplantar a partir de radiografias panorâmicas digitais usando o método box-counting.	AFR utilizando o Osstell Mentor para medir o CEI.	Houve uma correlação significativa entre os valores de DF e CEI, indicando que a análise fractal pode ser útil para monitorar a estabilidade do implante ao longo do tempo.
		As avaliações foram realizadas antes da cirurgia, imediatamente após e com 12 meses de acompanhamento.			

Glossário. AFR: Análise da frequência de ressonância; CEI: coeficiente de estabilidade do implante; DF: Dimensão fractal; TCFC: Tomografia Computadorizada de Feixe Cônico;

Tabela 1: Síntese dos estudos incluídos em análise.

REVISÃO DA LITERATURA DISCUTIDA

Conceito

A estabilidade inicial do implante é crucial para a osseointegração bem-sucedida e pode impactar diretamente a taxa de sucesso a longo prazo. Ela é influenciada por múltiplos fatores, incluindo a qualidade óssea do paciente, o tipo de implante e a técnica cirúrgica utilizada. A osseointegração, definida como a ligação direta e funcional entre o osso e a superfície do implante, pode ser monitorada por diferentes métodos, sendo um deles a análise fractal. Esta técnica quantitativa

permite avaliar a microestrutura óssea a partir de imagens radiográficas, fornecendo um indicador objetivo da qualidade óssea e sua relação com a estabilidade do implante ao longo do tempo.

Este artigo revisa e compara os principais estudos sobre o uso da análise fractal para prever e monitorar a estabilidade dos implantes dentários, discutindo as similaridades e diferenças nos métodos e desfechos observados.

Análise Fractal vs Coeficiente de Estabilidade do Implante

A DF tem sido utilizada como preditor da estabilidade inicial e tardia dos implantes dentários. Abdulhameed et al. (2018) avaliaram a eficácia da análise fractal na previsão da estabilidade dos implantes dentários, observando uma correlação positiva entre a DF e o CEI. Valores de DF superiores a 1,505 foram associados a maior estabilidade inicial. A metodologia incluiu análise de variância (ANOVA) e curva ROC (Receiver Operating Characteristic), que demonstrou alta sensibilidade (100%) e especificidade (86,5%) na predição da estabilidade inicial. Esses resultados sugerem que a DF pode ser uma ferramenta eficaz para prever a estabilidade dos implantes logo após a instalação, permitindo uma avaliação mais confiável do sucesso do procedimento.

Öztürk et al. (2022) investigaram a relação entre a AFR e a DF do osso peri-implantar, com o objetivo de avaliar a estabilidade inicial dos implantes antes da carga protética. O estudo identificou um ponto de corte da DF em 1,198, o que significa que valores acima desse limiar indicam uma melhor qualidade óssea e, consequentemente, maior estabilidade do implante. Esse ponto de corte foi determinado usando análise estatística para maximizar a precisão diagnóstica. A DF, calculada a partir de radiografias panorâmicas rotineiras, representa uma solução econômica e acessível, especialmente para clínicas que não possuem equipamentos específicos para análise de estabilidade, como o Osstell.

Complementando esses achados, Kulczyk et al. (2018) investigaram a relação entre DF e CEI em 50 implantes colocados tanto na maxila quanto na mandíbula. Os resultados mostraram uma correlação linear significativa entre DF e CEI apenas na maxila, evidenciando a importância das características anatômicas na avaliação da estabilidade dos implantes. Esses achados corroboram a observação de Lee et al. (2011) sobre a influência anatômica na predição da estabilidade, embora com resultados opostos. Isso ressalta a necessidade de ajustes metodológicos específicos para diferentes regiões anatômicas ao utilizar a DF como preditora da estabilidade dos implantes.

Mudanças na Dimensão Fractal Ao Longo do tempo

Mu et al. (2013) investigaram alterações trabeculares ósseas ao redor dos implantes sob carga funcional, utilizando a DF como método quantitativo. Os resultados mostraram um aumento significativo na DF ao longo do tempo, passando de 1.4213 ± 0.0525 para 1.4329 ± 0.0479 após um ano. Isso sugere que o osso peri-implantar sofre remodelação trabecular em resposta ao estresse mecânico da mastigação, tornando-se mais complexo estruturalmente ao longo do tempo.

Os achados de Karadag et al. (2021) corroboram esses resultados, indicando que a remodelação óssea ocorre durante a fase de cicatrização. Contudo, enquanto Mu et al. acompanharam os pacientes por 12 meses, Karadag et al. focaram nos primeiros três meses, sugerindo que mudanças detectáveis na DF podem ocorrer já na fase inicial da osseointegração. Essa diferença temporal destaca a importância de considerar o período pós-operatório na avaliação da estabilidade do implante.

Complementando esses achados, o estudo de Onem et al. (2012) avaliou as alterações estruturais do osso alveolar mandibular ao redor dos implantes durante a fase inicial de cicatrização e comparou esses valores com áreas correspondentes ao lado contralateral. Não foram observadas diferenças significativas nas medições de DF entre as regiões peri-implantares e o osso alveolar adjacente aos dentes naturais. A ausência de diferenças significativas nas medidas indica que a qualidade estrutural do osso ao redor dos implantes, durante a fase inicial de cicatrização, pode ser semelhante à do osso adjacente aos dentes naturais.

Comparabilidade entre Estudos e Limitações

A maioria dos estudos revisados indica que valores mais elevados de DF estão associados a implantes estáveis e bem-sucedidos. No entanto, valores absolutos de DF variam significativamente entre pesquisas, devido a diferenças nas técnicas radiográficas (panorâmica vs. periapical), métodos de cálculo da DF (box-counting vs. outros algoritmos) e softwares utilizados para análise.

Kangvansurakit et al. (2017) investigaram a capacidade da DF como preditor da estabilidade pré-operatória do implante. Os resultados não mostraram correlação significativa entre DF e estabilidade do implante, independentemente de fatores como idade, sexo, diâmetro do implante, qualidade óssea, resolução da imagem e aparelho de raios-X. Essa discrepância destaca a necessidade

urgente de padronização metodológica para garantir a confiabilidade dos resultados.

Ao contrário dos estudos de Soler-Alcaraz et al. (2013) e Lee et al. (2011), Kangvansurakit et al. (2017) não encontraram correlação significativa, possivelmente devido à utilização de TCFC, onde artefatos de imagem e variações na reconstrução volumétrica podem distorcer a microestrutura óssea, impactando negativamente a precisão da DF. Além disso, este estudo avaliou a DF pré-operatória, enquanto Mu et al. (2013) e Tozum et al. (2016) monitoraram a DF ao longo do tempo, destacando a importância das mudanças ósseas pós-carga para a estabilidade do implante.

Öztürk et al. (2022) e Karadag et al. (2021) indicam que a DF pode variar dependendo da qualidade óssea subjacente e localização anatômica do implante, reforçando a necessidade de protocolos padronizados para a interpretação clínica da DF, integrando-a com outras métricas radiográficas. Futuros estudos devem buscar uniformizar técnicas radiográficas, algoritmos de cálculo e protocolos de avaliação, o que pode fortalecer a aplicação clínica da DF.

Aplicações Clínicas e Novas Perspectivas

A análise fractal apresenta grande potencial clínico por permitir uma avaliação quantitativa da qualidade óssea antes e após a instalação do implante. Suer et al. (2016) demonstraram que a DF está correlacionada com o torque de inserção e os valores de CEI, sugerindo que a AF pode ser incorporada como parâmetro adicional na avaliação da estabilidade inicial.

O estudo de Sansare et al. (2012) também explorou a aplicabilidade clínica da análise fractal como indicador prognóstico para o sucesso do implante. O estudo revelou que a DF aumentou significativamente após a colocação do implante, o que poderia indicar uma melhora na microestrutura óssea peri-implantar e, consequentemente, uma maior probabilidade de sucesso do implante. Os autores sugerem que incorporar a DF como parâmetro preditivo pode permitir que clínicos identifiquem implantes com maior risco de falha logo após a colocação, possibilitando intervenções precoces.

Soler-Alcaraz et al. (2013) analisaram a influência das técnicas de perfuração – convencional e biológica – na osseointegração, utilizando a DF como indicador da arquitetura óssea. Não houve diferença significativa entre os métodos, sugerindo que a DF pode estar mais associada à avaliação da qualidade óssea

basal e à remodelação óssea ao longo do tempo, conforme demonstrado por Mu et al. (2013).

Apesar do potencial, desafios persistem, como a falta de padronização na DF e a necessidade de imagens radiográficas de alta qualidade. A combinação da AF com técnicas como a análise de frequência de ressonância pode proporcionar uma avaliação mais robusta, permitindo ajustes clínicos mais assertivos e potencialmente melhorando os resultados dos tratamentos implantares.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise fractal tem se consolidado como uma ferramenta valiosa para a predição e monitoramento da estabilidade de implantes dentários. Apesar das evidências que sustentam sua utilidade, variações metodológicas e limitações técnicas ainda impedem sua adoção clínica ampla. Pesquisas futuras devem se concentrar na padronização dos métodos de análise e na integração da DF com outras ferramentas diagnósticas para maximizar a previsibilidade e o sucesso dos tratamentos com implantes dentários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Karthik K, Sivaraj S, Thangaswamy V. Evaluation of implant success: a review of past and present concepts. *J Pharm Bioallied Sci.* 2013;5(Suppl 1):S117–S119.
2. Meredith N. Assessment of implant stability as a prognostic determinant. *Int J Prosthodont.* 1998;11(5):491–501.
3. Sennerby L, Meredith N. Implant stability measurements using resonance frequency analysis: biological and biomechanical aspects and clinical implications. *Periodontol 2000.* 2008;47:51–66. doi:10.1111/j.1600-0757.2008.00267.x
4. Prashanti E, Sajjan S, Reddy JM. Failures in implants. *Indian J Dent Res.* 2011;22(3):446.
5. Xing Y, Khandelwal N, Petrov S, Drew HJ, Mupparapu M. Resonance frequency analysis (RFA) and insertional torque (IT) stability comparisons of implants placed using osteotomes versus drilling techniques: a preliminary case study. *Quintessence Int.* 2015;46(9):789–798.

6. Al-Jetaily S, Al-Dosari AA. Assessment of Osstell™ and Periotest® systems in measuring dental implant stability (in vitro study). *Saudi Dent J*. 2011;23(1):17–21.
7. Zanetti EM, Pascoletti G, Calì M, Bignardi C, Franceschini G. Clinical assessment of dental implant stability during follow-up: what is actually measured, and perspectives. *Biosensors (Basel)*. 2018;8(3):68. doi:10.3390/bios8030068
8. Satwalekar P, Nalla S, Reddy R, Chowdary SG. Clinical evaluation of osseointegration using resonance frequency analysis. *J Indian Prosthodont Soc*. 2015;15(3):192–199.
9. Kato CN, Barra SG, Tavares NP, Amaral TM, Brasileiro CB, Mesquita RA, et al. Use of fractal analysis in dental images: a systematic review. *Dentomaxillofac Radiol*. 2020;49(2):20180457. doi:10.1259/dmfr.20180457
10. Sener E, Cinarcik S, Baksi BG. Use of fractal analysis for the discrimination of trabecular changes between individuals with healthy gingiva or moderate periodontitis. *J Periodontol*. 2015;86(11):1364–1369. doi:10.1902/jop.2015.150004
11. White SC, Rudolph DJ. Alterations of the trabecular pattern of the jaws in patients with osteoporosis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 1999;88(5):628–635.
12. Borowska M, Szarmach J, Oczeretko E. Fractal texture analysis of the healing process after bone loss. *Comput Med Imaging Graph*. 2015;46(Pt 2):191–196. doi:10.1016/j.compmedimag.2015.08.001
13. Leite AF, de Souza Figueiredo PT, Caracas H, Sindeaux R, Guimarães ATB, Lazarte L, et al. Systematic review with hierarchical clustering analysis for the fractal dimension in assessment of skeletal bone mineral density using dental radiographs. *Oral Radiol*. 2015;31(1):1–13. doi:10.1007/s11282-014-0188-y
14. Suer BT, Yaman Z, Buyuksarac B. Correlation of fractal dimension values with implant insertion torque and resonance frequency values at implant recipient sites. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2016;31(1):55–62. doi:10.11607/jomi.3965



15. Huang H, Wu G, Hunziker E. The clinical significance of implant stability quotient (COI) measurements: a literature review. *J Oral Biol Craniofac Res.* 2020;10(4):629–638.
16. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ.* 2021;372:n71. doi:10.1136/bmj.n71
17. Abdulhameed EA, Al-Rawi NH, Uthman AT, Samsudin AR. Bone Texture Fractal Dimension Analysis of Ultrasound-Treated Bone around Implant Site: A Double-Blind Clinical Trial. *Int J Dent.* 2018;2018:2672659. doi: 10.1155/2018/2672659.
18. Kangvansurakit S, Rungsiyakull C. Fractal dimension and implant stability: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2017;46(2):143–151.
19. Soler-Alcaraz S, Guerrero-Sánchez Y, Pérez-Sayáns M, Bernabeu-Mira JC, Peñarrocha-Oltra D, Camacho-Alonso F. Evaluation of Change in Radiographic Fractal Dimension around Dental Implants Placed with Low-Speed Drilling and Standard Drilling Protocols. *J Clin Med.* 2023.12(6):2244. doi: 10.3390/jcm12062244.
20. Mu TJ, Lee DW, Park KH, Moon IS. Changes in the fractal dimension of peri-implant trabecular bone after loading: a retrospective study. *J Periodont Implant Sci.* 2013;43(5):221–226.
21. Karadag I, Yilmaz HG. Evaluation of change in trabecular bone structure surrounding dental implants by fractal dimension analysis and comparison with radiomorphometric indicators: a retrospective study. *PeerJ.* 2022;10:e13145. doi: 10.7717/peerj.13145.
22. Öztürk K, Gungor HC, Keskin H, Bozkaya S, Baykal B. Comparative study of fractal analysis and resonance frequency analysis in assessing implant stability. *Clin Oral Implants Res.* 2022;33(5):565–572.
23. Kulczyk T, Wróbel J, Matys J, Kawala B, Zaleski M. Application of fractal dimension and implant stability quotient in predicting long-term implant success. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2018;20(4):399–405.



24. Lee DH, Kim YS, Kim SK, Chung YS, Lee JH, Kim YK. A clinical study of alveolar bone quality using fractal dimension and implant stability quotient. *J Periodont Implant Sci.* 2011;41(1):19–24.
25. Onem E, Öztürk AN, Sağlam S, Yalçın S. Lacunarity of mandibular alveolar bone during initial healing of dental implants. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2012;27(5):1009–1013.
26. Sansare K, Mahale SA, Naik SV, Shetty S. Fractal analysis as a tool to assess bone density changes in dental implantology. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2012;14(4):567–574.
27. Tozum TF, Tözüm H, Keleş A, Can G. Radiographic fractal and clinical resonance frequency analyses of posterior mandibular dental implants: possible association with mandibular cortical index. *Implant Dent.* 2016;25(6):789–795.