



UNIVERSIDADE
FERNANDO
PESSOA

A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA A ANÁLISE AUTOMÁTICA DE IMAGENS CBCT/TC. APLICAÇÕES NO PLANEAMENTO DE IMPLANTES DENTÁRIOS. ESTUDO COMPARATIVO DE UM CASO CLÍNICO

[Artificial Intelligence for the automatic analysis of CBCT/ CT images. Applications in dental
implant planning. Comparative study of a clinical]

Dissertação de Mestrado

Medicina Dentária

Pauline Marie Lapina

Orientador:

Doutor José Paulo Mendes Guimarães de Macedo

Outubro 2024

A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA A ANÁLISE AUTOMÁTICA DE IMAGENS CBCT/TC. APLICAÇÕES NO PLANEAMENTO DE IMPLANTES DENTÁRIOS. ESTUDO COMPARATIVO DE UM CASO CLÍNICO

[Artificial Intelligence for the automatic analysis of CBCT/ CT images. Applications in dental implant planning. Comparative study of a clinical case]

Dissertação de Mestrado

Medicina Dentária

Pauline Marie Lapina

Orientador:

Doutor José Paulo Mendes Guimarães de Macedo

Outubro 2024

À mes parents, pour leur soutien indéfectible, leur amour inconditionnel et leur foi en moi tout au long de ce parcours.

À ma grand-mère Nénette, qui n'est plus parmi nous aujourd'hui, mais qui restera à jamais dans mon cœur. Merci pour tout l'amour, la sagesse et les valeurs que tu m'as transmises.

À ma grand-mère Xaviere , qui n'est plus la aujourd'hui , merci pour m'avoir transmis ta discipline.

Cette thèse est le fruit de votre présence, de votre bienveillance et de votre inspiration. C'est à vous que je la dédie, avec tout mon amour et ma reconnaissance.

AGRADECIMENTOS

Je tiens tout d'abord à remercier du fond du cœur mes parents, sans qui cette aventure n'aurait jamais été possible. Merci pour votre soutien indéfectible, votre patience et votre investissement financier qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici. Vous avez cru en moi à chaque étape, et c'est grâce à vous que je me tiens aujourd'hui à la fin de ce long chemin.

À mon frère et à ma sœur, qui m'ont offert leur amour et leur soutien sans faille, je vous remercie d'avoir été ma force et ma motivation. Vous avez toujours été là pour moi, et je ne pourrais être plus reconnaissante.

À Jayson, la rencontre de ma vie, mon binôme, mon âme sœur : merci d'avoir été à mes côtés à chaque moment. Ta présence, ton soutien et ton amour m'ont permis de rester motivée et de surmonter les moments les plus difficiles. C'est un privilège de partager cette vie avec toi.

À Luce, avec qui tout avait mal commencé, mais qui est aujourd'hui devenue une partie essentielle de ma vie. Merci de faire partie de ma famille, je sais que je te garderai toujours près de moi, c'est avec toi que j'ai découvert l'amour d'une sœur je t'aime.

À Élise, ma plus vieille amie, celle qui sait toujours me remettre sur le droit chemin, merci pour ta sagesse, ton soutien et ta présence constante. Tu as été un phare dans les moments de doute.

À Rebecca et Lou, mes petites sœurs de cœur, merci pour votre tendresse et votre amitié. Vous avez su m'apporter de la légèreté et du réconfort quand j'en avais le plus besoin.

À JF et Clémentine, merci pour cette merveilleuse aventure et cette rencontre unique. Vous avez enrichi cette expérience et laissé une trace indélébile dans mon cœur.

À toutes les personnes avec qui j'ai partagé cette aventure, merci pour les moments de joie, de partage, de soutien et d'amitié. C'est grâce à vous tous que ce voyage a été si exceptionnel.

À ma cousine Marie Gerald, merci pour ta bonne humeur et tes "conneries" qui m'ont toujours fait garder le sourire, même dans les moments les plus stressants. Ta joie de vivre est un cadeau inestimable.

A Dani, ma plus belle rencontre portugaise, sans toi ce passage de ma vie aurait été bien différent. Je t'aime.

À mon oncle Jean Noël, chirurgien-dentiste, merci pour ton aide précieuse et ton soutien. Ta présence et tes conseils m'ont été d'une grande aide. Et à Tatie Noël, sa femme, merci également pour ta bienveillance et ton soutien tout au long de ce parcours.

Merci à toutes ma famille, mes cousins, mes cousines, tante et oncles que je n'ai pas mentionnés, pour votre amour, votre soutien.

Enfin, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à mon professeur de thèse Dr Jose Paulo Mendes Guimarães de Macedo, qui a toujours été réactif, impliqué et à l'écoute. Merci d'avoir su me guider, de m'avoir accordé votre temps, et d'avoir cru en mon travail. Votre expertise et votre bienveillance ont été des piliers essentiels dans la réalisation de ce projet.

À chacun d'entre vous, je vous exprime ma gratitude la plus profonde.

Merci d'avoir rendu cette expérience inoubliable.

RESUMO

O plano de tratamento para a colocação de implantes dentários é uma etapa essencial para o sucesso da reabilitação de pacientes parcialmente ou totalmente desdentados.

O planeamento preciso dos implantes é facilitado pela utilização de imagens CBCT (Tomografia Computorizada de Feixe Cónico) ou TC, que fornecem uma visão tridimensional detalhada das estruturas maxilares. No entanto, a análise meramente observacional destas imagens está sujeita a erros de interpretação.

O objetivo principal desta tese foi comparar as decisões e os resultados da colocação de implantes dentários orientada por IA com aqueles realizados por um profissional sem o recurso à IA, de modo a avaliar o potencial da IA no planeamento de implantes. Para tal, procurámos utilizar técnicas de IA capazes de automatizar a análise das imagens CBCT ou TC, detetando as estruturas anatómicas, avaliando a densidade e a disponibilidade óssea e simulando virtualmente o posicionamento ideal dos implantes.

No entanto, apesar de este objetivo principal ter sido estabelecido, não foi totalmente alcançado devido à falta de software capaz de realizar esta tarefa de forma completa até ao momento. Os softwares de IA utilizados permitem atualmente apenas a segmentação das imagens, limitando a possibilidade de um plano de tratamento totalmente autónomo e impedindo a comparação direta com as decisões humanas.

Dado que o objetivo principal não era realizável, definimos um objetivo secundário: utilizar um dos softwares de IA mais desenvolvidos atualmente para a análise das imagens CBCT, avaliando as suas capacidades e limitações. Para tal, utilizámos o software Diagnocat, que permitiu uma segmentação automatizada das imagens CBCT e possibilitou uma comparação da análise das imagens CBCT realizada pelo dentista e pelo software de IA.

Em conclusão, o uso da inteligência artificial para a análise automática de imagens CBCT ou TC no planeamento de implantes dentários representa um avanço significativo para a odontologia, abrindo caminho para práticas mais eficazes e seguras. No entanto, embora a IA traga inovações significativas, ainda apresenta limitações, nomeadamente na capacidade de realizar um plano de tratamento completo sem intervenção humana. É, portanto, crucial salientar que os softwares de IA utilizados aqui permitem apenas a segmentação automática, o que limita a concretização do nosso objetivo principal.

Palavra-Chaves: “artificial intelligence in dentistry”, “CBCT”, “diagnostic”, “implants”, “Diagnocat”, e a mistura destes termos

ABSTRACT

The treatment plan for dental implant placement is an essential step for the successful rehabilitation of partially or fully edentulous patients. Accurate implant planning is facilitated by the use of CBCT (Cone Beam Computed Tomography) or CT images, which provide a detailed three-dimensional view of maxillary structures. However, a purely observational analysis of these images is subject to interpretative errors.

The primary objective of this thesis was to compare the decisions and outcomes of dental implant placement guided by AI with those performed by a professional without the use of AI, to assess AI's potential in implant planning. To achieve this, we sought to employ AI techniques capable of automating the analysis of CBCT or CT images, detecting anatomical structures, evaluating bone density and availability, and virtually simulating the optimal positioning of implants.

However, despite establishing this primary objective, it was not fully achieved due to the lack of software capable of performing this task comprehensively to date. The AI software currently available only allows for image segmentation, limiting the possibility of a fully autonomous treatment plan and preventing a direct comparison with human decisions.

Given that the primary objective was not achievable, we defined a secondary objective: to use one of the most advanced AI software currently available to analyze CBCT images, assessing its capabilities and limitations. For this purpose, we used the Diagnocat software, which enabled automated segmentation of CBCT images and allowed for a comparison between the CBCT image analysis conducted by the dentist and that performed by the AI software.

In conclusion, the use of artificial intelligence for the automatic analysis of CBCT or CT images in dental implant planning represents a significant advancement in dentistry, paving the way for more effective and safer practices. However, although AI brings significant innovations, it still presents limitations, particularly in its ability to perform a complete treatment plan without human intervention. It is, therefore, crucial to highlight that the AI software used here only allows for automated segmentation, which limits the achievement of our primary objective.

Keywords: “artificial intelligence in dentistry”, “CBCT”, “diagnostic”, “implants”, “Diagnocat”, and a mix of these terms.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE DAS FIGURAS	IX
LISTAS DAS ABREVIATURAS	XI
I. INTRODUÇÃO	1
1. Introdução Inteligência artificial	1
2. Aplicação da inteligência artificial à radiografia	3
3. Planeamento de colocação implantes dentários assistido por IA	4
4. Objetivos	6
5. Materiais e métodos	7
II. CASO CLÍNICO	11
1. Resumo do Caso Clínico	11
2. Histórico do Tratamento e Etapas	11
2.1 Primeira Etapa: Enxerto Ósseo Sinusoidal	11
2.2 Segunda Etapa: Colocação dos Implantes	12
3. Análise Radiográfica e Resultados	13
4. Avaliação e Síntese Clínica	14
5. Implicações Clínicas	14
6. Principais Funcionalidades do Diagnocat	16
6.1 Vantagens do Diagnocat	16
6.2 Público-alvo	17
7. Segmentação das estruturas ósseas	19
7.1 Maxila	19

7.2 Mandíbula	19
7.3 Seio maxilar	19
8. Segmentação dos dentes e estruturas associadas	20
8.1 Dentes	20
8.2 Polpa dentária	20
9. Medição da altura óssea enxertada	20
10. Outras estruturas anatômicas segmentadas	21
10.1 Crânio	21
10.2 Canal incisivo	21
10.3 Tecidos moles	21
11. Cortes de tomografia computadorizada (CT scan)	21
12. Segmentação das estruturas ósseas e sinuais	23
12.1 Maxila (Osso do maxilar superior)	23
12.2 Seio maxilar	23
13. Segmentação dos implantes dentários	24
13.1 Implantes dentários	24
13.2 Dentes adjacentes	24
14. Relação entre os implantes e o osso enxertado	24
15. Visualização dos tecidos moles	24
III. DESENVOLVIMENTO	27
1. Segmentação automática com Diagnocat vs. Interpretação manual das imagens CBCT	27
2. Visualização interativa 3D com Diagnocat vs. Visualização 2D/3D limitada com CBCT	27
3. Automação da análise com Diagnocat vs. Interpretação manual com CBCT	27
4. Ferramentas de análise integradas no Diagnocat vs. Dependência de softwares externos no CBCT	28
5. Visualização personalizada no Diagnocat vs. Visualização abrangente no CBCT	28

IV. DISCUSSÃO	31
1. A inteligência artificial na radiologia dentária com Diagnocat	31
1.1 Estudo adicional sobre a IA e o desempenho em imagens CBCT	32
2. A inteligência artificial no reconhecimento de implantes dentários	33
3. A inteligência artificial no planeamento de colocação de implantes dentários	34
4. Comparação dos benefícios da IA no diagnóstico e planeamento de implantes	35
4.1 Impactos adicionais da IA no diagnóstico e planeamento de implantes dentários	35
5. Implicações éticas da inteligência artificial na medicina dentária	37
6. Perspetiva futura	38
V. CONCLUSÃO	41
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura 1. Ortopantomografia do caso clínico	12
Figura 2. Ortopantomografia após colocação dos implantes	13
Figura 3. Ortopantomografia após o tratamento finalizado	15
Figura 4. Software Diagnocat segmentação automática pre-implante	18
Figura 5. Segmentação dos seios maxilares e tamanho do enxerto ósseo	18
Figura 6. Segmentação dos seios maxilares	19
Figura 7. Segmentação seio maxilar esquerdo, corte sagital, pós-implante, tamanho do implante	22
Figura 8. Cortes axial, sagital e coronal do implante em imagens 3D	22
Figura 9. Segmentação sagital, coronal e axial do seio maxilar e imagens 3D com tecido aparente	23

LISTAS DAS ABREVIATURAS

ANN: Redes neurais artificiais

CBCT: Tomografia Computorizada de Feixe Cônico

CNN: Redes neurais convolucionais

IA: Inteligência artificial

MLP: Redes neurais de percepção multicamada

NN: Redes neurais

I. INTRODUÇÃO

1. Introdução Inteligência artificial

A inteligência artificial (IA) teve sua origem no meio do século XX, com a ambição de criar máquinas capazes de reproduzir as funções cognitivas humanas. A ideia inicial da IA foi apresentada na conferência de Dartmouth em 1956, conduzida por John McCarthy, que a definiu como "a ciência e engenharia de criar máquinas inteligentes" (de Angelis et al., 2022). Essa conferência foi um marco no desenvolvimento da IA, incentivando a colaboração entre diferentes campos científicos, como a matemática, lógica, neurociências e, posteriormente, a informática, que era uma área emergente na época. Essa sinergia interdisciplinar lançou as bases para os primeiros desenvolvimentos na área da inteligência artificial.

No início, as pesquisas em IA focaram na simulação de processos cognitivos complexos, como a resolução de problemas, a lógica formal e o processamento simbólico. Durante esse período, houve esforços significativos para criar algoritmos capazes de resolver tarefas que, até então, eram vistas como exclusivas da inteligência humana, como resolver enigmas, jogar xadrez e provar teoremas matemáticos. Embora esses sistemas tenham sido capazes de realizar tarefas específicas, a limitação da capacidade de processamento dos computadores da época restringiu o progresso dessas iniciativas (Ding H et al., 2023).

A partir das décadas de 1960 e 1970, a IA ganhou grande impulso com financiamentos substanciais e um interesse crescente, especialmente em contextos acadêmicos. Durante esse período, houve avanços significativos na representação do conhecimento e no desenvolvimento de técnicas para resolver problemas específicos de maneira mais eficiente (Ding H et al., 2023).

No entanto, o entusiasmo em torno da IA começou a diminuir nas décadas de 1970 e 1980, período frequentemente chamado de "inverno da IA". Isso se deveu principalmente às limitações dos sistemas simbólicos baseados em regras explícitas, que não eram capazes de lidar com problemas mais complexos nem aprender de forma autônoma com dados. Além disso, os computadores da época não tinham poder computacional suficiente para processar grandes volumes de dados, o que limitava o potencial desses sistemas (De Angelis et al., 2022).

A partir da década de 1990, houve uma reviravolta significativa no campo da IA, com o advento da aprendizagem automática (machine learning). Em vez de depender de regras pré-definidas, a aprendizagem automática permitiu que os sistemas de IA aprendessem diretamente a partir de dados, revelando-se uma abordagem muito mais flexível e poderosa. Isso se tornou especialmente relevante com o surgimento das redes neurais artificiais (ANN), que foram inspiradas no funcionamento do cérebro humano (Hung K et al., 2020). As ANN são compostas por várias camadas de neurônios artificiais interconectados que permitem que os sistemas processem informações de maneira mais sofisticada, reconhecendo padrões complexos nos dados fornecidos (Ding H et al., 2023).

Nos primeiros anos do século XXI, outro avanço importante ocorreu com o surgimento da aprendizagem profunda (deep learning), uma subcategoria da aprendizagem automática que utiliza redes neurais com várias camadas, conhecidas como redes neurais convolucionais (CNN). As CNN revolucionaram áreas como a visão computacional, o processamento de linguagem natural e, mais recentemente, a medicina e a odontologia. Essas tecnologias são capazes de processar grandes volumes de dados não estruturados, como imagens, áudio e até mesmo dados textuais, com precisão e eficiência superiores (Putra R H et al., 2022).

Com o avanço contínuo da IA, ela começou a desempenhar um papel cada vez mais importante na área da saúde, incluindo a odontologia. De acordo com Schwendicke et al. (2020), as redes neurais convolucionais e os modelos de deep learning foram fundamentais para melhorar o diagnóstico, o planejamento de tratamentos e a personalização do atendimento aos pacientes, com base nas necessidades individuais. Essas tecnologias, que começaram como experimentos científicos, hoje são ferramentas essenciais na prática clínica moderna, proporcionando soluções eficazes para problemas que antes exigiam muito tempo e esforço (Ossowska et al., 2022).

Atualmente, a IA é usada em várias indústrias e sectores, incluindo a medicina dentária, onde está em plena expansão. As ferramentas de IA, particularmente as CNN e redes neurais profundas, estão mudando a forma como os diagnósticos são realizados, otimizando os tratamentos e personalizando o atendimento com base nos dados individuais de cada paciente. O uso da IA em medicina e odontologia leva inovações consideráveis, permitindo que os profissionais realizem diagnósticos e tratamentos com maior rapidez, precisão e eficiência (Hung K et al., 2020).

2. Aplicação da inteligência artificial à radiografia

O uso de inteligência artificial em técnicas radiográficas alterou profundamente as práticas de diagnóstico em odontologia. Entre as inovações mais importantes, destaca-se o uso da tomografia volumétrica de feixe cônico (CBCT), que gera imagens tridimensionais de alta resolução das estruturas dentárias e maxilofaciais. A tomografia CBCT é especialmente valiosa em procedimentos complexos, como o planejamento de implantes dentários, cirurgias ortodônticas e a gestão de patologias periodontais (Gillot M et al., 2023). No entanto, a interpretação manual dessas imagens pode ser demorada e sujeita a erros humanos. É nesse contexto que a IA se torna uma ferramenta crucial para os profissionais.

As redes neurais convolucionais (CNN), uma subcategoria avançada da IA, permitem o processamento de grandes volumes de dados radiográficos e a extração de informações essenciais para o diagnóstico. Essas tecnologias demonstraram grande eficácia na detecção automática de fraturas radiculares, lesões peri-apicais e cáries, permitindo diagnósticos mais rápidos e precisos (Hung K et al., 2020). Ao automatizar essas tarefas, os sistemas de IA reduzem significativamente o tempo de processamento das imagens, além de minimizar erros decorrentes da análise humana (Ding H et al., 2023).

Uma característica essencial das CNN é sua capacidade de analisar não apenas anomalias evidentes, mas também localizar estruturas anatômicas complexas que são críticas para o planejamento de tratamentos cirúrgicos, como a colocação de implantes dentários (Putra R H et al., 2022). Essa localização precisa de pontos anatômicos ajuda a aumentar a reprodutibilidade dos resultados, proporcionando maior consistência no diagnóstico e planejamento cirúrgico. Um estudo recente indicou que os algoritmos de IA superam os métodos manuais em termos de precisão e velocidade na identificação de estruturas relevantes em radiografias (Hung K et al., 2020).

Além de melhorar a precisão diagnóstica, a IA também ajuda a reduzir o impacto da fadiga e da sobrecarga cognitiva, que podem afetar a qualidade das análises realizadas por profissionais de saúde ao longo de longas jornadas de trabalho. Enquanto a precisão humana pode ser afetada por esses fatores, a IA oferece uma análise consistente e confiável, sem perda de desempenho ao longo do tempo (Putra R H et al., 2022). Isso libera os profissionais para focarem em decisões mais complexas e personalizadas, aumentando a qualidade do atendimento aos pacientes (Ding H et al., 2023).

A análise de imagens volumétricas tridimensionais geradas pela CBCT também se beneficia enormemente do uso da IA. Devido à quantidade massiva de informações contidas nessas imagens, sua análise manual pode ser extremamente trabalhosa e sujeita a erros. No entanto, algoritmos de IA são capazes de processar essas imagens de maneira eficiente, fornecendo informações críticas, como a densidade óssea e a morfologia das estruturas dentárias, o que é vital para personalizar os tratamentos cirúrgicos, particularmente em implantologia (Ding H et al., 2023).

Outro aspecto importante da IA em radiografia é sua capacidade preditiva. Ao utilizar algoritmos de aprendizagem automática, os sistemas de IA podem identificar pacientes que têm maior risco de desenvolver complicações ou que possivelmente necessitarão de intervenções cirúrgicas adicionais. Isso possibilita um planejamento antecipado dos cuidados, oferecendo uma abordagem mais proativa e personalizada, com melhores resultados terapêuticos (Hung K et al., 2020). Essas ferramentas de IA não apenas melhoram a eficiência dos tratamentos, mas também reduzem os custos e o tempo necessário para alcançar resultados satisfatórios.

A integração da IA na leitura de imagens CBCT também foi objeto de estudos comparativos. Uma pesquisa recente avaliou a eficácia dos exames conduzidos por profissionais humanos em comparação com sistemas baseados em IA, como o Diagnocat, para detectar lesões periodontais em imagens CBCT (Schulze et al., 2024). O estudo revelou que, embora a IA seja útil em algumas áreas, os dentistas humanos ainda demonstraram maior precisão na detecção de certos tipos de lesões, como osteólise periapical e envolvimento de furca (Schulze et al., 2024). Apesar disso, a IA pode ser uma ferramenta de apoio valiosa, especialmente para a análise inicial de grandes conjuntos de dados.

3. Planejamento de colocação implantes dentários assistido por IA

Na implantologia dentária, o sucesso das intervenções cirúrgicas depende amplamente de uma avaliação precisa de fatores como densidade óssea, localização anatômica e outros parâmetros específicos de cada paciente. A inteligência artificial desempenha um papel cada vez mais central na otimização desses processos, permitindo a automatização e a melhoria da análise desses parâmetros por meio de algoritmos avançados de aprendizagem automática. Esses sistemas são capazes de avaliar dados fundamentais,

como a densidade e qualidade do osso, além de outros fatores biomecânicos críticos para garantir uma osteointegração eficaz e uma estabilidade a longo prazo dos implantes dentários (Ding H et al., 2023).

Os algoritmos de IA também analisam dados de imagens médicas, como as obtidas por tomografia volumétrica de feixe cônico (CBCT), para identificar os locais mais apropriados para a colocação dos implantes. Isso possibilita uma colocação mais precisa, reduzindo os riscos de falhas, como demonstrado por estudos que correlacionam a densidade óssea com a estabilidade dos implantes (Gillot M et al., 2023). Além disso, os profissionais podem utilizar essas informações para prever a estabilidade inicial do implante, garantindo melhores resultados a longo prazo (Ossowska et al., 2022).

Estudos recentes demonstraram que a IA pode prever a osteointegração com precisão significativa utilizando radiografias simples, o que reduz a necessidade de métodos mais invasivos para avaliar a qualidade do implante (Oh S et al., 2023). Isso destaca o potencial da IA para transformar o planeamento de implantes dentários, tornando-o mais eficiente e menos invasivo para os pacientes.

A automação do processo de análise radiográfica por IA também permite uma padronização dos procedimentos, eliminando a variabilidade na interpretação manual e garantindo resultados mais consistentes. Tradicionalmente, a análise de imagens CBCT é uma tarefa que exige tempo e experiência do profissional, mas com o uso de IA, essa etapa pode ser significativamente acelerada, melhorando a reprodutibilidade e a precisão dos tratamentos implantológicos (Hung K et al., 2020).

Embora os avanços sejam promissores, é necessário continuar a desenvolver pesquisas para validar a aplicação da IA em diversos contextos clínicos e garantir sua eficácia em cenários reais. A adoção em larga escala dessas tecnologias depende de sua capacidade de demonstrar resultados consistentes e de garantir a segurança dos pacientes em um ambiente clínico (Schwendicke et al., 2020). No entanto, a IA já está mostrando um potencial notável para transformar a odontologia, tornando os tratamentos mais seguros, precisos e personalizados (Putra R H et al., 2022).

4. Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é automatizar o processo de análise das imagens CBCT ou TC com a ajuda de técnicas de IA. Este objetivo visava inicialmente comparar as decisões e os resultados da colocação de implantes dentários orientada por IA com aqueles realizados por um profissional sem recurso à IA, com o objetivo de avaliar o potencial da IA no planejamento do tratamento de implantes. Este objetivo inclui a melhoria da precisão na detecção das estruturas anatômicas, a avaliação da qualidade óssea, a seleção do tipo de implante e o posicionamento virtual do implante. No entanto, é importante notar que este objetivo principal não foi totalmente alcançado, uma vez que, aquando da conceção desta tese, não existia um software de IA suficientemente desenvolvido e capaz de realizar esta tarefa de forma completa. Após várias pesquisas, nenhum software foi identificado que permitisse um planejamento totalmente automatizado.

Face a esta dificuldade, foi definido um objetivo secundário: utilizar um dos softwares de IA mais avançados atualmente disponíveis, o software Diagnocat, para analisar as imagens CBCT, avaliando as suas capacidades e limitações. Este software permitiu analisar as imagens CBCT e realizar uma segmentação automática, embora não permita ainda um planejamento global mais aprofundado. Esta comparação concentra-se, assim, especificamente na eficácia da análise automática da IA aplicada às imagens CBCT, em comparação com o trabalho efetuado pelo dentista.

Desta forma, esta nova abordagem gerou uma discussão aprofundada sobre a utilização da IA em radiologia, as suas vantagens, a sua evolução no campo da implantologia, bem como algumas das suas limitações atuais.

Além disso, o objetivo secundário inclui a demonstração da eficácia e utilidade da IA no processo de planejamento de implantes dentários. Ao destacar a capacidade da IA de analisar rapidamente e com precisão as imagens, esta pesquisa procura mostrar como a integração destas ferramentas pode melhorar o trabalho dos dentistas, facilitar a sua tomada de decisão e, por fim, melhorar os resultados clínicos.

Para verificar a sua eficácia, o software de IA (DIAGNOCAT) foi aplicado a imagens CBCT de um caso clínico antes e depois da colocação dos implantes, a fim de comparar os resultados obtidos pelo dentista e pela IA.

Ao integrar estas ferramentas de IA nos fluxos de trabalho clínicos, os dentistas podem beneficiar de um planeamento de implantes mais rápido, mais preciso e mais personalizado. Isto pode conduzir a resultados cirúrgicos mais previsíveis, a menos complicações pós-operatórias e a uma maior satisfação dos pacientes.

A utilização da inteligência artificial para a análise automática das imagens CBCT ou TC no planeamento de implantes dentários representa, assim, um avanço significativo no campo da odontologia, abrindo caminho para práticas clínicas mais eficazes e seguras. Pode também ser considerada um recurso relevante na área dentária.

Para a realização da minha tese, apenas a segmentação automática foi possível. O objetivo primário não foi alcançado, pois, após várias pesquisas, nenhum software estava suficientemente desenvolvido até ao momento para permitir um plano de tratamento totalmente automatizado.

O objetivo secundário permitirá, através da análise de um caso clínico, avaliar as capacidades do software de IA para analisar automaticamente as imagens CBCT em comparação com um dentista, revelando assim as suas limitações e potencialidades.

5. Materiais e métodos

Este estudo baseia-se num caso clínico que visa realizar uma análise comparativa de imagens radiológicas para o planeamento e a colocação de implantes dentários, alinhando-se assim com os objetivos propostos. O objetivo principal desta tese foi comparar as decisões e os resultados da colocação de implantes dentários orientada por IA com aqueles realizados por um profissional sem recurso à IA, de modo a avaliar o potencial da IA no planeamento de implantes. Para tal, procurámos utilizar técnicas de IA capazes de automatizar a análise das imagens CBCT ou TC, detetando as estruturas anatómicas, avaliando a densidade e a disponibilidade óssea e simulando virtualmente o posicionamento ideal dos implantes.

No entanto, este objetivo principal não era realizável, pois, na altura da conceção desta tese, não existia um software de IA suficientemente desenvolvido e capaz de alcançar totalmente este objetivo. Em consequência, definimos um objetivo secundário: utilizar um dos softwares de IA mais avançados atualmente disponíveis, o software Diagnocat, para analisar as imagens CBCT, avaliando as suas capacidades e limitações. Após uma

pesquisa sobre softwares de IA, o Diagnocat foi selecionado para avaliar este objetivo secundário. Alguns artigos publicados no PubMed discutem e avaliam o Diagnocat, e também contactámos a sede da empresa para obter informações adicionais, o que reforçou a nossa escolha deste software. Para tal, utilizámos as imagens CBCT de uma paciente que realizou uma colocação de implante dentário, transferimos as suas imagens para o software Diagnocat para serem analisadas, o que permitiu comparar uma análise clássica de CBCT com a análise automatizada do Diagnocat.

Para utilizar o Diagnocat, pagámos o acesso à IA no valor de 149 dólares e participámos numa teleconferência com a equipa do Diagnocat, que nos explicou em detalhe o modo de utilização, as vantagens, as desvantagens e as perspetivas futuras do software.

Este software em nuvem, especializado na análise de imagens CBCT e TC, permitiu uma segmentação automatizada das imagens CBCT e tornou possível uma comparação entre a análise realizada pelo dentista e a realizada pelo software de IA, contribuindo diretamente para o objetivo secundário deste estudo.

Aquisição das imagens

As imagens utilizadas neste estudo foram fornecidas por outro dentista e pertencem a uma paciente que assinou um consentimento informado, autorizando a utilização das suas imagens e informações médicas para fins deste estudo, garantindo a confidencialidade dos seus dados pessoais. As imagens CBCT foram analisadas durante um período de um mês com o auxílio do software *Diagnocat*. Esta análise incluiu a segmentação automática das estruturas anatómicas relevantes para a colocação dos implantes, abordando assim o objetivo secundário de demonstrar a eficácia e utilidade da IA no processo de planificação.

Pesquisa bibliográfica

Foi realizada uma pesquisa bibliográfica nas bases de dados PubMed para identificar os artigos relevantes publicados nos últimos cinco anos. As palavras-chave utilizadas para filtrar os resultados incluem: "inteligência artificial in dentistry", "implant", "diagnostic" e "CBCT", "Diagnocat". Após uma pesquisa inicial com base em palavras-chave, foram identificados 2 329 artigos. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, 1 338 artigos foram retidos para uma avaliação mais aprofundada. Destes, 260 artigos foram selecionados após a revisão dos títulos, e 90 artigos foram retidos após a análise dos

resumos. Por fim, uma análise detalhada do conteúdo permitiu selecionar 21 artigos para inclusão final neste estudo. Em suma, esta metodologia permite realizar um estudo comparativo fiável, baseado em ferramentas modernas de inteligência artificial, imagens obtidas com consentimento informado e uma análise rigorosa da literatura científica recente.

Os critérios de inclusão bibliográficos são:

- Artigos publicados em inglês, francês e português.
- Artigos publicados nos últimos cinco anos (desde 2019).

Os critérios de exclusão bibliográficos são:

- Artigos publicados antes de 2019; (este critério visa garantir que as informações utilizadas são atuais e refletem os últimos avanços na área).
- Os critérios de exclusão são todos os artigos sobre inteligência artificial que não se coadunem com o propósito da tese.
- Estudo envolvendo pacientes com menos de 18 anos.

Critérios de inclusão dos pacientes:

- Pacientes sem patologias subjacentes: Serão incluídos apenas pacientes em bom estado de saúde geral, sem condições médicas que possam influenciar a planificação ou colocação dos implantes dentários.
- Consentimento informado: Os pacientes devem ter assinado um consentimento informado que autorize a utilização dos seus dados médicos e radiográficos no âmbito deste estudo.
- Tratamento bem-sucedido: Serão incluídos os pacientes que se submeteram a uma intervenção de colocação de implantes dentários considerada bem-sucedida, ou seja, com integração correta dos implantes e ausência de complicações pós-operatórias.

Critérios de exclusão dos pacientes:

- Pacientes com menos de 18 anos: O estudo exclui pacientes menores de idade, garantindo a representatividade dos resultados numa população adulta.

Inteligência Artificial para a análise automática de imagens CBCT/ TC. Aplicações no planeamento de implantes dentários. Estudo comparativo de um caso clínico

-Ausência de radiografia CBCT: Pacientes que não tenham realizado uma radiografia CBCT (Cone Beam Computed Tomography) não serão incluídos no estudo, uma vez que esta imagem é essencial para a análise comparativa com a IA.

II. CASO CLÍNICO

1. Resumo do Caso Clínico

A paciente, MP, nascida a 3 de dezembro de 1941, foi submetida a um procedimento de reabilitação dentária que incluiu um enxerto ósseo do seio maxilar e a colocação de três implantes dentários na região posterior do maxilar superior. Este caso clínico descreve as várias fases do tratamento, desde o enxerto ósseo até à inserção dos implantes, destacando os protocolos de tratamento, os resultados radiográficos e a avaliação final do sucesso da intervenção.

2. Histórico do Tratamento e Etapas

2.1 Primeira Etapa: Enxerto Ósseo Sinusoidal

No dia 16 de fevereiro de 2022, a paciente foi submetida a uma cirurgia para realizar um enxerto ósseo sinusoidal no seio maxilar esquerdo (cf. figura 2). A técnica escolhida para este procedimento foi o acesso por aba lateral, que possibilita um melhor controlo no preenchimento ósseo em casos de défice ósseo significativo. Antes da cirurgia, foi implementado um protocolo pré-operatório que incluía antibióticos de largo espectro, juntamente com corticosteroides, para minimizar o risco de infeção e reduzir a inflamação no período pós-operatório.

O procedimento cirúrgico consistiu em criar uma abertura lateral na parede do seio maxilar para aceder à cavidade e proceder ao preenchimento com material ósseo. Esta técnica é frequentemente indicada para casos em que o volume ósseo existente é insuficiente para suportar futuros implantes dentários. Após a cirurgia, foram seguidas orientações pós-operatórias para facilitar a cicatrização, como a aplicação de gelo na face para reduzir o edema, a administração de analgésicos para controlar a dor e a realização de bochechos antissépticos para manter uma boa higiene oral durante a fase de cicatrização.

Figura 1. *Ortopantomografia do caso clínico*



2.2 Segunda Etapa: Colocação dos Implantes

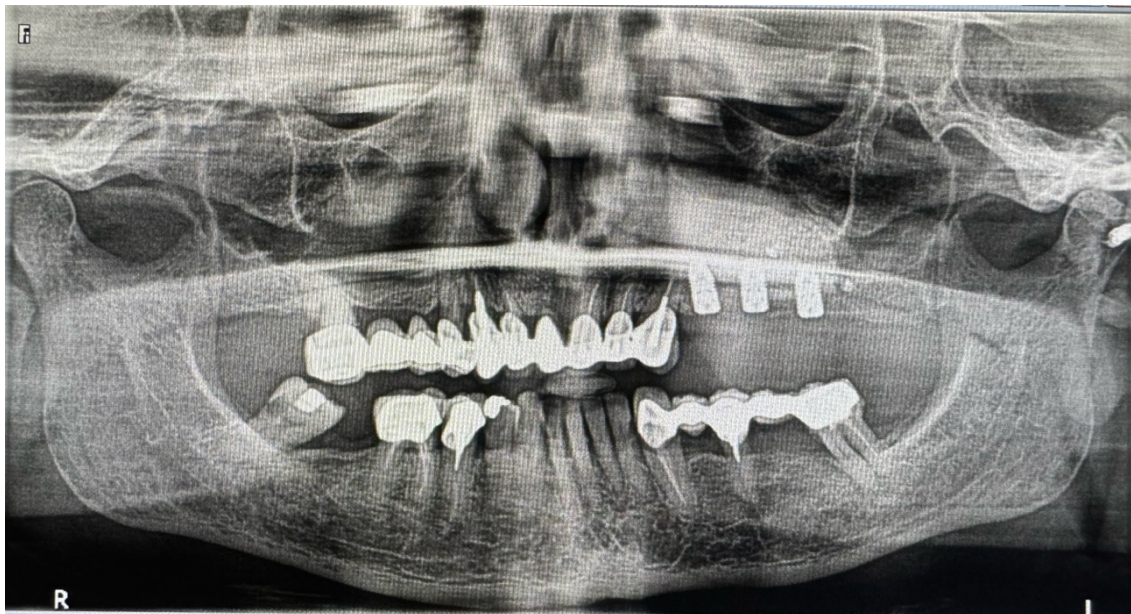
Após um período de cicatrização cuidadosamente respeitado de oito meses, no dia 4 de outubro de 2022, a paciente iniciou a segunda fase de seu tratamento de implantologia. Este procedimento envolveu a colocação de três implantes dentários de 9 mm da marca renomada Dentsply Sirona Astra EV (cf. Figura 3), escolhidos especificamente pela sua qualidade e desempenho na osteointegração. Esse longo período de recuperação teve como objetivo garantir a integração e consolidação ótimas do enxerto ósseo previamente realizado, criando assim condições favoráveis para a colocação dos implantes.

O ato cirúrgico foi realizado seguindo rigorosamente um protocolo cirúrgico padronizado, que inclui etapas precisas, como a preparação do local do implante, a inserção controlada dos implantes no maxilar e a aplicação de técnicas destinadas a promover a osteointegração. Esse processo é crucial para garantir que os implantes se integrem firmemente ao osso maxilar, condição indispensável para o sucesso a longo prazo das futuras restaurações protéticas.

No período pós-operatório, a paciente recebeu uma cobertura antibiótica para prevenir possíveis infecções nos locais dos implantes, uma medida preventiva essencial para reduzir o risco de complicações e garantir o sucesso da intervenção. O uso de antibióticos não só ajuda a proteger a cicatrização, como também assegura que o processo de osteointegração não seja comprometido por infecções ou inflamações. Esse acompanhamento cuidadoso

marca uma etapa crucial no caminho para a restauração funcional e estética do sorriso da paciente.

Figura 2. *Ortopantomografia após colocação dos implantes*



3. Análise Radiográfica e Resultados

A análise radiográfica foi fundamental para avaliar o sucesso do procedimento. Foram realizadas três séries de radiografias em diferentes fases do tratamento.

- **Antes do Enxerto Ósseo:** A primeira radiografia evidenciou uma reabsorção significativa do osso alveolar na região posterior esquerda do maxilar superior, resultando num aumento da cavidade do seio maxilar. A atrofia da crista alveolar exigiu a realização de um enxerto ósseo para permitir a futura colocação de implantes dentários. (cf. Figura 1)
- **Após o Enxerto Ósseo e Antes da Colocação dos Implantes:** A radiografia seguinte mostrou uma elevação bem-sucedida do assoalho sinusal e um aumento do volume ósseo na região posterior do maxilar, confirmando o sucesso do enxerto e a preparação adequada para a colocação dos implantes dentários.
- **Após a Colocação dos Implantes:** A radiografia panorâmica final mostrou os três implantes dentários corretamente posicionados na região posterior do maxilar superior esquerdo. Os implantes apresentavam-se bem integrados no osso e alinhados corretamente, indicando uma osteointegração eficaz. (cf. Figura 2 e 3)

4. Avaliação e Síntese Clínica

Aos 80 anos, a paciente apresentava um déficit ósseo significativo devido à atrofia da crista alveolar e à pneumatização do seio maxilar na região posterior esquerda do maxilar. (cf. figura 1) O enxerto ósseo sinusoidal realizado por meio de acesso por aba lateral permitiu restaurar o volume ósseo necessário para a inserção dos implantes dentários, assegurando a eficácia da reabilitação.

O protocolo terapêutico adotado incluiu medidas preventivas, como a administração de antibióticos de largo espectro e corticosteroides antes do enxerto, o que reduziu eficazmente os riscos de infecção e inflamação no pós-operatório. Os cuidados pós-operatórios, como a aplicação de gelo e a administração de analgésicos, contribuíram para uma cicatrização sem complicações. A cobertura antibiótica após a colocação dos implantes ajudou a prevenir infecções nos locais dos implantes.

Este caso clínico demonstra a eficácia da técnica de enxerto ósseo sinusoidal por acesso por aba lateral na reabilitação da atrofia óssea maxilar posterior. A utilização dos implantes dentários Dentsply Sirona Astra EV de 9 mm revelou-se adequada, oferecendo estabilidade e uma excelente integração no osso enxertado.

5. Implicações Clínicas

Este caso evidencia a importância de uma planificação pré-operatória cuidadosa, do uso de técnicas cirúrgicas comprovadas e de um acompanhamento pós-operatório adequado para garantir o sucesso dos tratamentos implantológicos em casos de déficit ósseo complexo. A abordagem multidisciplinar adotada neste caso, que combinou competências em cirurgia maxilo-facial e implantologia, permitiu obter resultados funcionais e estéticos ideais para a paciente.

Graças à precisão da técnica de acesso por aba lateral, foi possível aumentar significativamente o volume ósseo, assegurando um suporte adequado para os implantes dentários. O período de cicatrização de oito meses foi respeitado, favorecendo a osteointegração dos implantes. A adesão da paciente aos protocolos pré e pós-operatórios foi um fator determinante para o sucesso do procedimento.

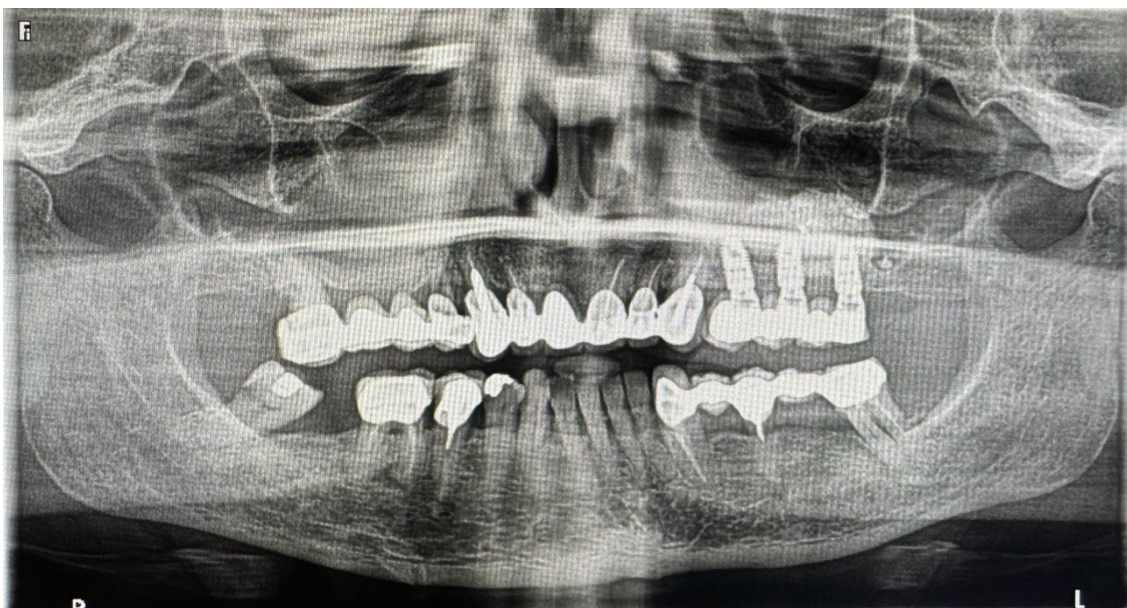
Em suma, este caso clínico ilustra a abordagem de uma atrofia óssea maxilar posterior através de uma técnica de enxerto ósseo sinusoidal seguida da colocação de implantes

dentários. A técnica de acesso por aba lateral permitiu um aumento significativo do volume ósseo, garantindo a estabilidade dos implantes a longo prazo. A escolha dos implantes Dentsply Sirona Astra EV de 9 mm contribuiu para o sucesso da reabilitação implantológica, proporcionando integração e estabilidade ótimas.

A abordagem multidisciplinar e o cumprimento rigoroso dos protocolos foram determinantes para o êxito deste tratamento complexo. Este caso destaca a importância de uma planificação rigorosa, de uma execução técnica precisa e de um acompanhamento pós-operatório adequado para garantir resultados positivos na implantologia dentária, mesmo em situações de desafios anatômicos, como a atrofia óssea.

Assim, este caso clínico contribui de forma valiosa para a literatura sobre intervenções implantológicas em contextos de perda óssea significativa, demonstrando que, através de técnicas avançadas de enxerto e implantologia, é possível reabilitar pacientes com condições ósseas complexas e oferecer-lhes uma solução de tratamento eficaz e duradoura.

Figura 3. *Ortopantomografia após o tratamento finalizado*



Neste caso clínico, utilizei o Diagnocat, um software baseado em inteligência artificial, para realizar uma segmentação precisa das estruturas dentárias e maxilo-faciais a partir dos dados radiológicos. Esta ferramenta permitirá melhorar a análise diagnóstica e orientar as decisões terapêuticas, oferecendo uma visualização clara e detalhada dos elementos anatômicos.

O Diagnocat é um software inovador desenvolvido para profissionais da área de odontologia, oferecendo soluções avançadas de análise e interpretação de imagens radiológicas utilizando inteligência artificial (IA). Baseado em tecnologias de aprendizado de máquina, o Diagnocat é capaz de analisar de forma eficiente e precisa imagens dentárias em 2D e 3D, como radiografias panorâmicas, tomografias CBCT (Tomografia Computadorizada de Feixe Cônico) e imagens intraorais.

6. Principais Funcionalidades do Diagnocat

Análise Avançada de Imagens 2D e 3D: Com algoritmos de IA de alta precisão, o Diagnocat realiza uma análise detalhada das imagens radiográficas dentárias, oferecendo uma avaliação minuciosa das estruturas orais. Ele identifica patologias como cáries, infecções, doenças periodontais, fraturas, lesões ósseas e outras anomalias, fornecendo informações essenciais para o diagnóstico.

Geração de Relatórios Automatizados: Após a análise das imagens, o software gera automaticamente relatórios personalizados e completos, facilitando a interpretação dos resultados tanto para os profissionais quanto para os pacientes, com anotações e esquemas explicativos.

Integração e Compatibilidade com Sistemas Existentes: O Diagnocat é compatível com os sistemas de gestão de clínicas e softwares radiológicos mais comuns, permitindo uma integração simples no fluxo de trabalho, o que melhora a eficiência dos serviços prestados.

Assistência no Diagnóstico e Planejamento de Tratamentos: O Diagnocat também auxilia no planejamento de tratamentos, especialmente em implantes, com a criação de visualizações 3D detalhadas das estruturas anatômicas, facilitando a preparação e execução dos procedimentos.

Ferramenta Educativa: Além de ser um recurso prático para o trabalho clínico, o Diagnocat serve como uma ferramenta de ensino, permitindo que estudantes e profissionais em formação analisem casos clínicos reais.

6.1 Vantagens do Diagnocat

Precisão e Confiabilidade: A IA do Diagnocat foi treinada com uma vasta base de dados de imagens radiológicas, garantindo alto nível de precisão na identificação de problemas orais.

Eficiência e Economia de Tempo: O software agiliza o processo de análise de imagens, entregando resultados em poucos minutos, permitindo que os profissionais se concentrem mais no atendimento ao paciente.

Melhora na Comunicação com Pacientes: Os relatórios detalhados ajudam os pacientes a entenderem melhor seu diagnóstico e plano de tratamento.

6.2 Público-alvo

O Diagnocat é voltado principalmente para dentistas, ortodontistas, periodontistas, cirurgiões orais, radiologistas dentários e instituições de ensino na área odontológica. Ele é útil em clínicas com múltiplos serviços e centros de radiologia dentária, além de ser um recurso valioso em universidades para a formação de futuros profissionais.

A definição fornecida pelo software Diagnocat é realizada com base nas informações geradas pelo próprio software.

Nesta tese, vou analisar imagens radiológicas dentárias utilizando o software Diagnocat, uma ferramenta baseada em inteligência artificial, com o objetivo de otimizar a interpretação dos dados 2D e 3D.

Figura 4. Software Diagnocat segmentação automática pre-implante

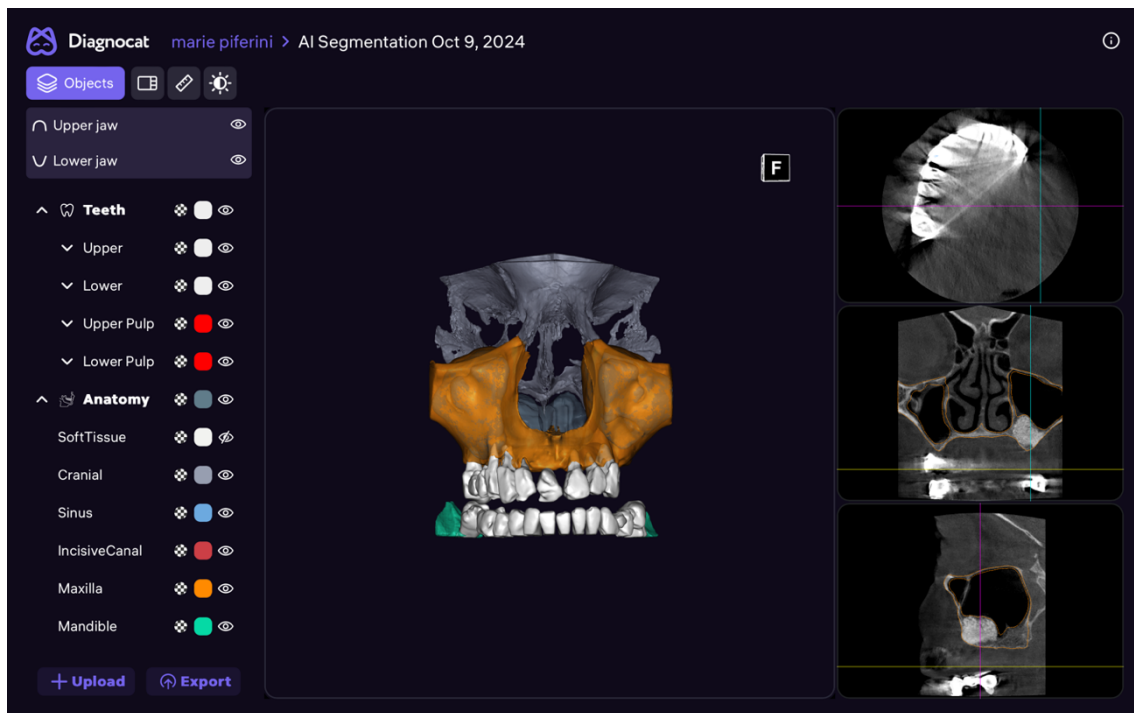


Figura 5. Segmentação dos seios maxilares e tamanho do enxerto ósseo

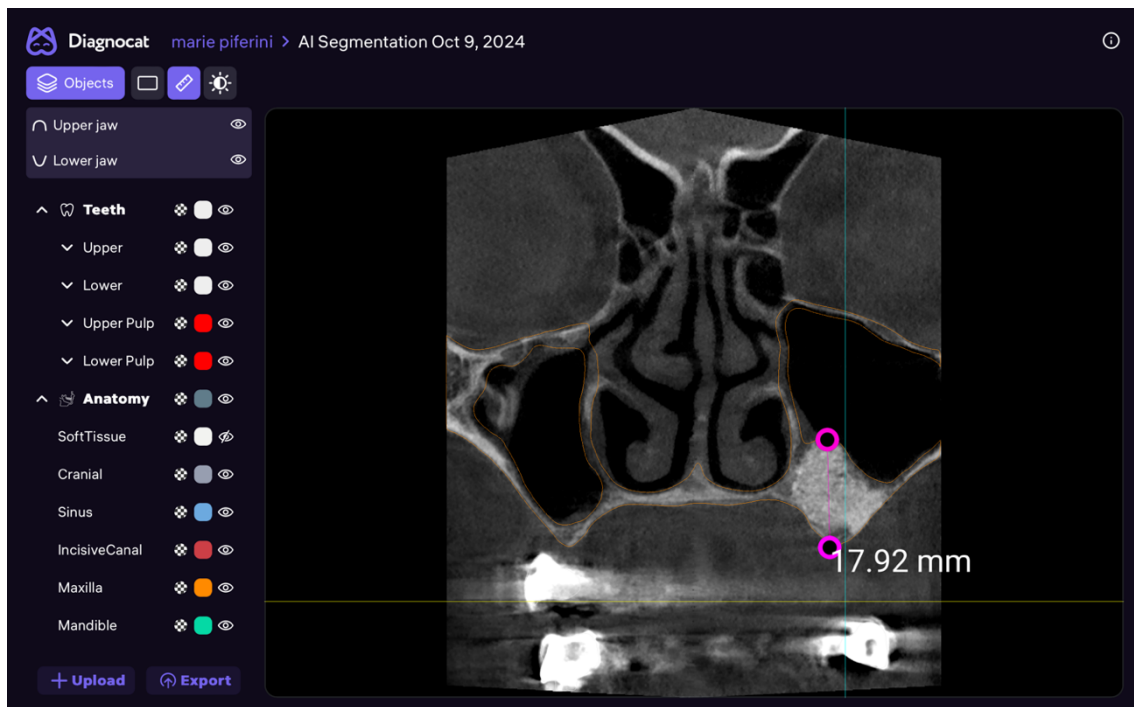
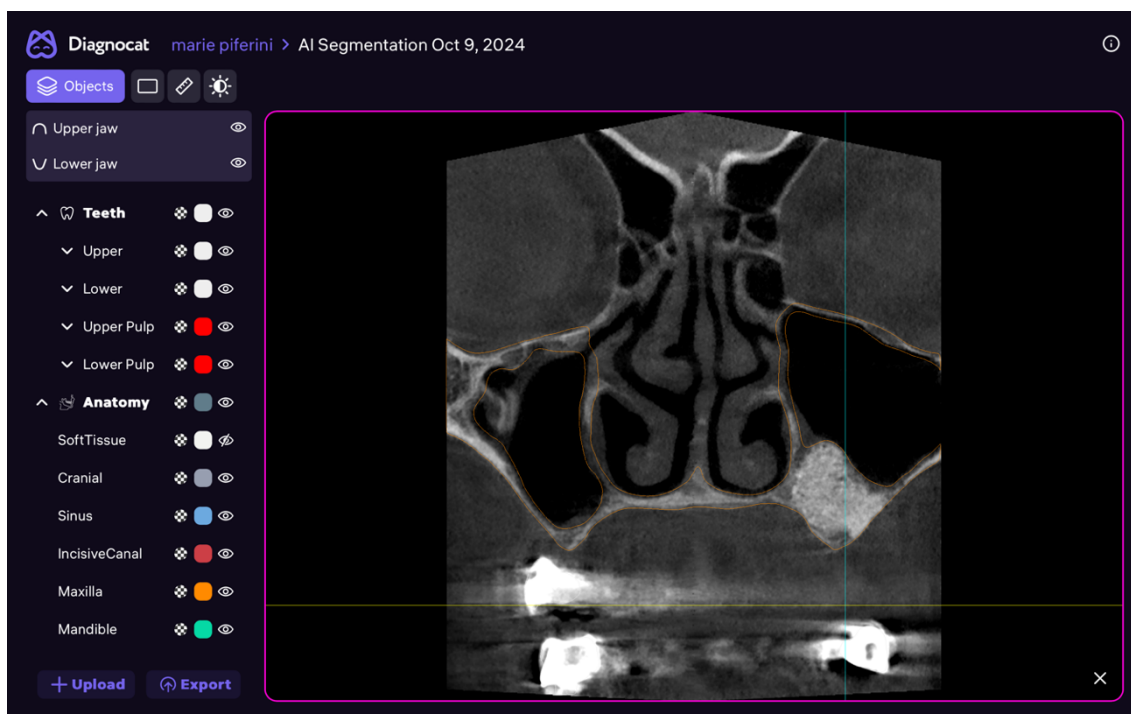


Figura 6. Segmentação dos seios maxilares



7. Segmentação das estruturas ósseas

7.1 Maxila

Nas imagens tridimensionais, a maxila está representada em laranja e seus contornos aparecem claramente nas cortes de tomografia computadorizada (CT). Esta estrutura óssea suporta os dentes superiores. No contexto de um procedimento de enxerto ósseo sinusal (também chamado "Sinus Lift"), é necessário adicionar material ósseo nesta região para aumentar a altura do osso disponível, permitindo assim a instalação de implantes dentários. A reabsorção óssea na maxila é comum após extrações dentárias ou com o envelhecimento, tornando a colocação de implantes difícil sem a realização de um enxerto devido à proximidade do seio maxilar. (cf. Figura 4)

7.2 Mandíbula

Representada em verde nas imagens, a mandíbula contém os dentes inferiores. Embora ela não seja diretamente afetada pelo enxerto ósseo sinusal, sua segmentação fornece um contexto anatômico completo, facilitando a interpretação das imagens. (cf. Figura 4)

7.3 Seio maxilar

Os contornos do seio maxilar estão visíveis em laranja nas imagens 2D, especialmente nas vistas coronais, axiais e sagitais. O seio é a cavidade localizada acima da maxila onde foi realizado o enxerto ósseo para permitir a colocação de implantes. A análise dos contornos do seio é essencial para verificar se o enxerto foi bem integrado e se a altura do osso é adequada. Na imagem coronal, embora os seios direito e esquerdo estejam visíveis, o foco está no seio esquerdo, onde a elevação óssea foi realizada. (cf. Figura 5 e 6)

8. Segmentação dos dentes e estruturas associadas

8.1 Dentes

Os dentes superiores (maxilares) e inferiores (mandibulares) estão segmentados em branco nas imagens 3D. Esta segmentação é crucial para avaliar o posicionamento exato dos implantes e para verificar o alinhamento e a oclusão dentária (o contato entre os dentes superiores e inferiores). (cf. Figura 4)

8.2 Polpa dentária

A polpa dentária está representada em vermelho nas imagens. Esta região corresponde à parte interna dos dentes, onde se encontram os nervos e vasos sanguíneos. Embora a polpa não esteja diretamente envolvida no enxerto ósseo, sua segmentação pode ser útil em futuros tratamentos, especialmente na fase de planeamento de próteses associadas aos implantes.

9. Medição da altura óssea enxertada

Na terceira imagem, uma medida de 17,92 mm é observada entre dois pontos roxos. Esta distância corresponde à altura do osso enxertado na região sinusal. Após um enxerto ósseo, é fundamental medir a quantidade de osso disponível para garantir que seja suficiente para a colocação de implantes dentários, que geralmente requerem uma profundidade de 10 a 15 mm, dependendo do tipo de implante. A medida mostrada sugere que o enxerto forneceu altura óssea suficiente para a colocação segura dos implantes, sem risco de perfuração da membrana sinusal. (cf. Figura 5 e 6)

10. Outras estruturas anatômicas segmentadas

10.1 Crânio

O crânio, segmentado em cinza, está representado ao redor das estruturas da maxila e do seio maxilar. Essas partes permitem situar as outras estruturas no contexto anatômico geral, facilitando sua análise.

10.2 Canal incisivo

O canal incisivo, segmentado em vermelho, contém nervos e vasos sanguíneos, sendo uma estrutura importante a ser considerada durante a colocação de implantes na região anterior da maxila, para evitar complicações.

10.3 Tecidos moles

Os tecidos moles, embora não ativados nesta representação, incluem as gengivas e outras estruturas que envolvem os ossos e os dentes. A avaliação dos tecidos moles desempenha um papel fundamental na estabilização dos implantes e na cicatrização pós-operatória, especialmente após um enxerto ósseo.

11. Cortes de tomografia computadorizada (CT scan)

As imagens axiais, coronais e sagitais de tomografia computadorizada oferecem uma visão detalhada das estruturas anatômicas segmentadas. Os contornos em laranja visíveis nestes cortes permitem uma avaliação precisa da região sinusal e da quantidade de osso enxertado. Estas imagens proporcionam uma análise profunda da estabilidade do enxerto e permitem garantir que não houve perfuração da membrana sinusal antes da colocação dos implantes. (cf. Figura 4)

Figura 7. Segmentação seio maxilar esquerdo, corte sagital, pós-implante, tamanho do implante

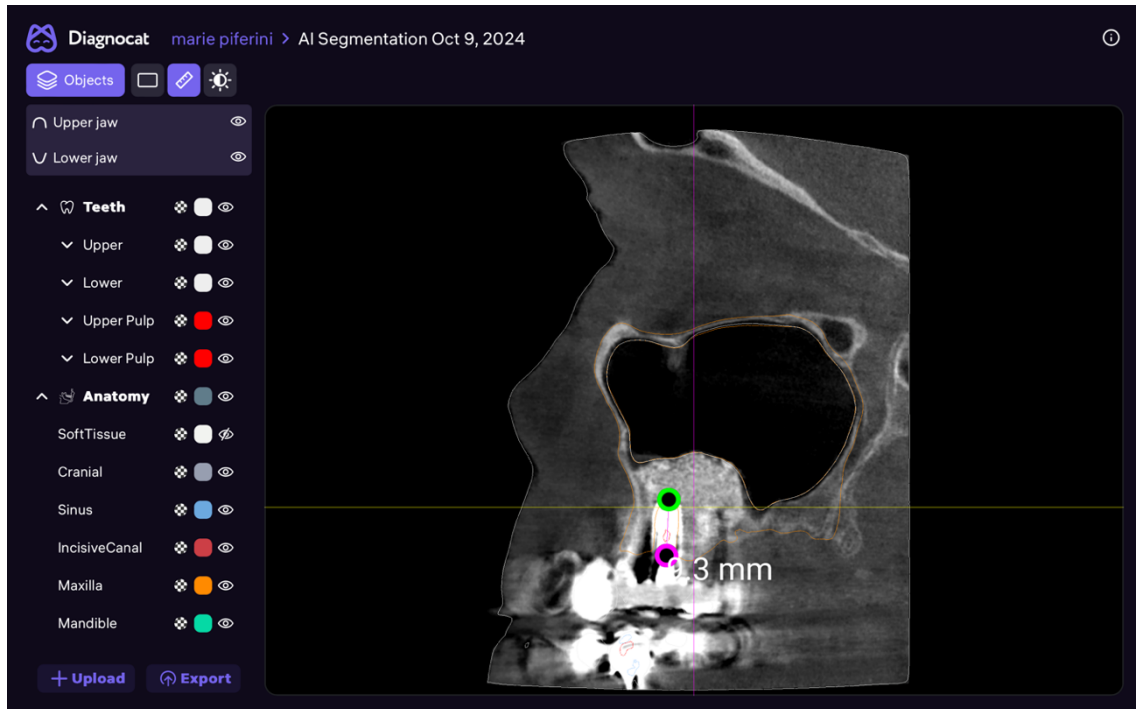


Figura 8. Cortes axial, sagital e coronal do implante em imagens 3D

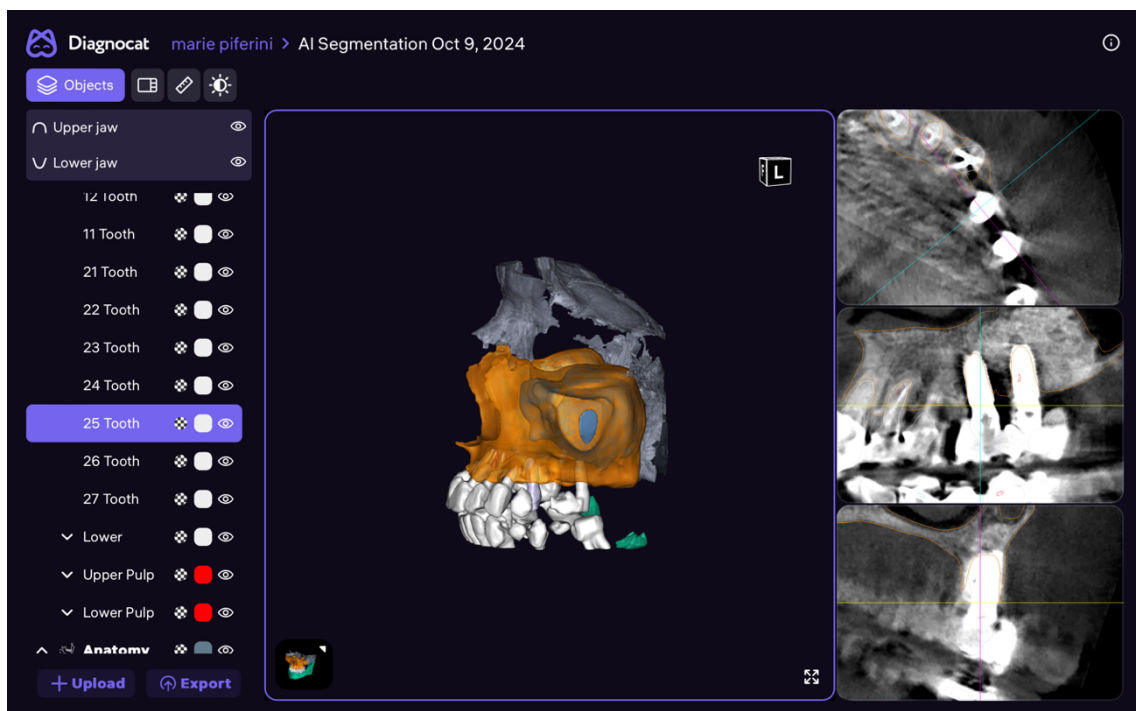
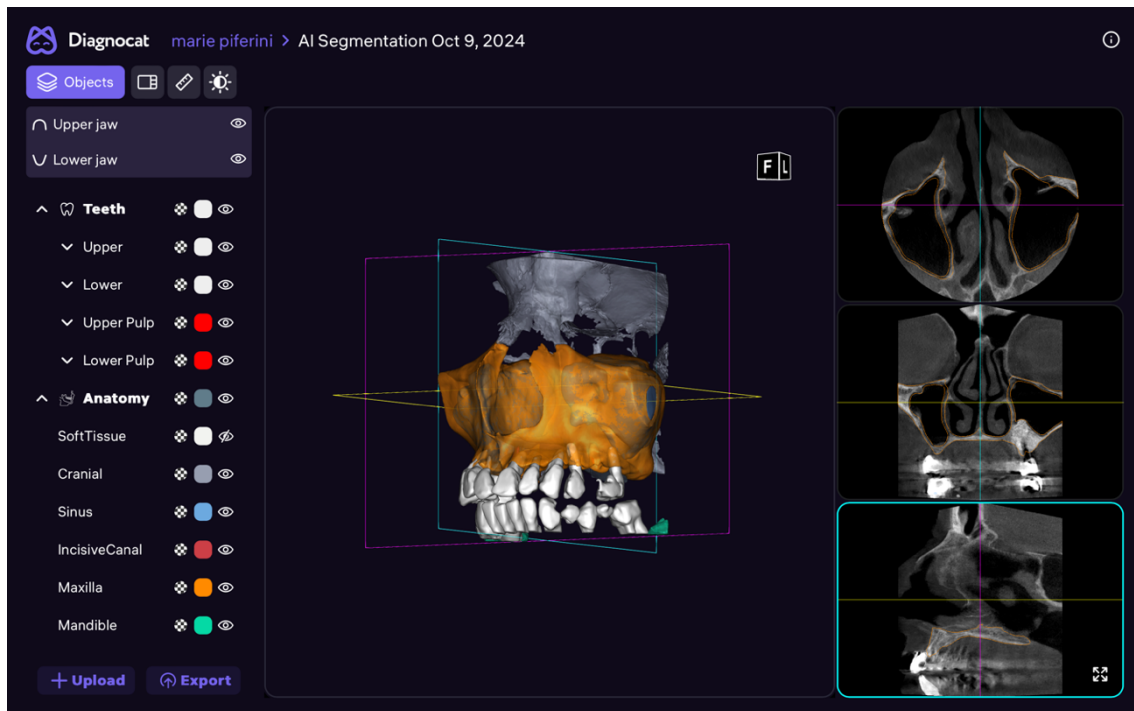


Figura 9. Segmentação sagital, coronal e axial do seio maxilar e imagens 3D com tecido aparente



12. Segmentação das estruturas ósseas e sinuais

12.1 Maxila (Osso do maxilar superior)

Segmentada em laranja, a maxila apresenta um enxerto ósseo bem visível, que permitiu a colocação do implante na região posterior da maxila. O osso enxertado ao redor do implante parece fornecer estabilidade suficiente para a sua integração. O volume de osso enxertado é crucial para oferecer um suporte adequado ao implante e evitar que este penetre na cavidade sinusal. (cf. Figura 8 e 9)

12.2 Seio maxilar

Os contornos do seio maxilar estão claramente definidos em laranja nas imagens de tomografia computadorizada. A integridade da membrana sinusal é um fator chave para o sucesso do procedimento, evitando complicações como infecções sinusais ou a migração do implante para dentro da cavidade sinusal. (cf. Figura 7)

13. Segmentação dos implantes dentários

13.1 Implantes dentários

Os implantes são visíveis nas imagens 2D, com uma medida de 9,3 mm. Essa medida corresponde ao comprimento total do implante. Esse comprimento do implante é adequado para a altura óssea após o enxerto e para a profundidade do osso disponível. A altura do enxerto ósseo garante a segurança do implante, mantendo uma distância adequada em relação ao seio. A imagem mostra que o implante está firmemente ancorado no osso enxertado, sem invasão da cavidade sinusal. (cf. Figura 7,8 e 9)

13.2 Dentes adjacentes

Os dentes naturais adjacentes aos implantes estão bem segmentados e posicionados corretamente em relação aos implantes. O alinhamento desses dentes é importante para garantir uma oclusão funcional e harmoniosa quando a coroa protética for colocada sobre o implante.

14. Relação entre os implantes e o osso enxertado

O comprimento do implante (9,3 mm) mostra que ele está bem-adaptado à quantidade de osso enxertado nessa região. Essa escolha de tamanho evita qualquer comprometimento da membrana sinusal, ao mesmo tempo que assegura uma boa estabilidade do implante. O volume de osso enxertado ao redor do implante parece ser suficiente, o que sugere uma boa osteointegração (ligação entre o osso e o implante). (cf. Figura 7)

15. Visualização dos tecidos moles

Embora os tecidos moles não estejam ativados na segmentação, seu bom estado é importante para a cicatrização ao redor do implante e para garantir a estabilidade da futura prótese. Uma boa gestão dos tecidos moles proporciona uma melhor higiene bucal e reduz o risco de inflamação ao redor do implante.

Conclusão

A medida de 9,3 mm corresponde ao tamanho do implante, que está bem-adaptado à quantidade de osso enxertado na região posterior da maxila. A segmentação mostra que

os implantes estão bem posicionados e integrados no osso enxertado, mantendo uma distância segura em relação ao seio maxilar. Isso sugere que o enxerto ósseo foi bem-sucedido em fornecer a altura óssea necessária para garantir a segurança dos implantes, que estão prontos para a fase protética. Essa situação parece muito favorável para o sucesso a longo prazo dos implantes e para a colocação das coroas protéticas.

Inteligência Artificial para a análise automática de imagens CBCT/ TC. Aplicações no planeamento de implantes dentários. Estudo comparativo de um caso clínico

III. DESENVOLVIMENTO

Comparação entre a análise radiológica com o software Diagnocat e o scanner CBCT convencional

1. Segmentação automática com Diagnocat vs. Interpretação manual das imagens CBCT

O Diagnocat utiliza inteligência artificial para segmentar automaticamente as estruturas anatômicas. Diferentes partes, como os dentes, as mandíbulas e os seios, são identificadas e exibidas em tempo real com cores diferentes, facilitando a análise clínica. Essa segmentação visual imediata permite uma identificação clara e intuitiva das estruturas.

Em contraste, um scanner CBCT convencional gera imagens 3D de alta resolução, mas estas são cortes brutos (axiais, coronais e sagitais) sem segmentação automática. Cabe ao clínico, como o radiologista ou dentista, interpretar manualmente as imagens e identificar as estruturas anatômicas, o que demanda mais tempo e habilidade.

2. Visualização interativa 3D com Diagnocat vs. Visualização 2D/3D limitada com CBCT

O Diagnocat permite uma visualização 3D interativa, na qual o usuário pode manipular, ampliar e isolar diferentes partes anatômicas (mandíbulas, dentes, seios, etc.). Esta funcionalidade proporciona uma compreensão mais profunda das estruturas e patologias, permitindo uma análise mais detalhada. Além disso, o software permite alternar entre visualizações 2D e 3D conforme necessário.

Embora o CBCT convencional permita a reconstrução de imagens 3D com softwares específicos, a manipulação das imagens geralmente é menos intuitiva. O clínico precisa examinar vários cortes 2D para formar uma compreensão tridimensional, o que pode tornar a interpretação mais complexa.

3. Automação da análise com Diagnocat vs. Interpretação manual com CBCT

Com o Diagnocat, a inteligência artificial automatiza a identificação das estruturas anatômicas, economizando tempo. Elementos como dentes, ossos maxilares, polpas

dentárias e seios são detetados e classificados automaticamente. Essa automação minimiza o risco de erros humanos e agiliza o processo de análise.

No CBCT convencional, a interpretação é totalmente manual. O clínico deve examinar cada corte individualmente para identificar anomalias e estruturas, o que pode aumentar a possibilidade de erro e tornar o processo mais demorado.

4. Ferramentas de análise integradas no Diagnocat vs. Dependência de softwares externos no CBCT

O Diagnocat inclui diversas ferramentas de análise, como a medição de distâncias, a identificação de possíveis patologias e a geração automática de relatórios baseados nos resultados da análise. Além disso, permite sobrepor informações, como visualizar simultaneamente dentes e seios maxilares, para facilitar a compreensão dos casos clínicos.

Embora o CBCT forneça imagens de alta qualidade, geralmente é necessário utilizar softwares externos para realizar medições precisas e interpretar os resultados. Isso adiciona etapas ao fluxo de trabalho e torna o processo de análise mais demorado.

5. Visualização personalizada no Diagnocat vs. Visualização abrangente no CBCT

O Diagnocat permite ativar ou desativar a visualização de certas estruturas específicas, como tecidos moles, dentes ou ossos, permitindo ao clínico concentrar-se nos elementos mais relevantes para o diagnóstico. Essa personalização facilita uma análise mais direcionada e eficiente.

Em comparação, o CBCT convencional fornece todas as informações em um único conjunto de imagens, o que oferece uma visão geral das estruturas maxilofaciais. No entanto, não há opção para ocultar ou destacar estruturas específicas sem o uso de ferramentas adicionais.

O Diagnocat melhora significativamente o processo de análise radiológica ao integrar inteligência artificial para segmentação automática e personalização das imagens CBCT. Ele proporciona uma interpretação mais rápida e precisa por meio de ferramentas avançadas de análise e visualização interativa em 3D. Em comparação, um scanner CBCT

convencional, apesar de fornecer imagens de alta qualidade, requer uma interpretação manual mais demorada e não possui funcionalidades integradas para segmentação ou análise automática das estruturas. Portanto, o Diagnocat oferece uma vantagem significativa para os clínicos, especialmente em áreas que exigem uma análise rápida e precisa, como a implantodontia ou a ortodontia.

Inteligência Artificial para a análise automática de imagens CBCT/ TC. Aplicações no planeamento de implantes dentários. Estudo comparativo de um caso clínico

IV. DISCUSSÃO

Embora esta pesquisa tenha explorado o impacto da inteligência artificial (IA) na área da odontologia, não conseguimos alcançar o objetivo principal da tese, que era comparar as decisões e os resultados da colocação de implantes dentários orientada por IA com aqueles realizados por um profissional sem recurso à IA, a fim de avaliar o potencial da IA no planeamento de tratamento dos implantes. Perante esta dificuldade, foi estabelecido um objetivo secundário: utilizar um dos softwares de IA mais avançados atualmente disponíveis, o software Diagnocat, para analisar as imagens CBCT, avaliando as suas capacidades e limitações.

Esta nova abordagem engendrou uma discussão aprofundada sobre a utilização da IA em radiologia, as suas vantagens, a sua evolução no domínio da implantologia, bem como algumas das suas limitações atuais.

A inteligência artificial (IA) está sendo cada vez mais integrada em vários domínios da medicina, incluindo a odontologia, onde desempenha um papel fundamental na melhoria do diagnóstico e planeamento de tratamentos. O Diagnocat, um sistema baseado em IA que utiliza redes neurais convolutivas (CNN), é um excelente exemplo desses avanços. O Diagnocat foi concebido para auxiliar os dentistas automatizando várias tarefas na análise de imagens CBCT (Tomografia Computadorizada de Feixe Cônico), com foco em aspetos como segmentação dos dentes, deteção de cáries, periodontite e outras anomalias dentárias (Ezhov M et al.,2021).

1. A inteligência artificial na radiologia dentária com Diagnocat

O Diagnocat tem como objetivo acelerar e melhorar os processos de diagnóstico utilizando a imagem CBCT, que se tornou um padrão na odontologia para a visualização 3D das estruturas dentárias e ósseas. Ao contrário dos métodos tradicionais de imagem, como as radiografias panorâmicas ou intraorais, a CBCT permite uma visão mais detalhada e precisa, mas também exige competências técnicas avançadas para a interpretação dos dados. É aqui que a IA do Diagnocat entra em jogo, fornecendo uma ajuda preciosa para interpretar esses dados complexos.

Uma das principais vantagens do Diagnocat é o uso de redes neurais convolutivas (CNN), uma tecnologia de deep learning especializada no reconhecimento de imagens. Com essa

abordagem, o software IA automatiza tarefas essenciais, como a segmentação dos dentes e maxilares, bem como a identificação de patologias específicas, como cáries e periodontite (Ezhov M et al.,2021). Esta automação não só economiza tempo, mas também melhora a precisão dos diagnósticos realizados pelos dentistas.

1.1 Estudo adicional sobre a IA e o desempenho em imagens CBCT

Um estudo recente reforça a eficácia da IA na análise de imagens CBCT, com sistemas de IA alcançando um coeficiente de similaridade DICE de 0,85, indicando que a segmentação realizada pela IA se aproxima da realizada manualmente por especialistas humanos. Isso corrobora os resultados obtidos com o Diagnocat, que também mostrou um desempenho elevado na segmentação dentária e na deteção de patologias (Badr FF & Jadu FM, 2022). Além disso, a precisão média de 0,88 e o recall de 0,93 observados em uma metanálise sobre o uso da IA na CBCT indicam que a IA pode atuar com eficácia similar à dos dentistas, especialmente em cenários de alta carga de trabalho (Badr FF & Jadu FM 2022).

No que diz respeito à especificidade, o Diagnocat também obteve bons resultados, com uma especificidade de 0,9672 em comparação com 0,9616 para o grupo não assistido. A especificidade mede a capacidade do sistema de evitar falsos positivos, o que reduz o número de diagnósticos errados (Ezhov M et al., 2021). Tal indica que o Diagnocat não apenas melhora a deteção de patologias, mas também reduz erros, especialmente em casos onde uma patologia pode ser confundida com artefatos visuais.

Um dos aspetos mais apreciados do Diagnocat é a redução do tempo de diagnóstico. O estudo mostrou que os dentistas que usaram o Diagnocat levaram, em média, 17,55 minutos para analisar um exame CBCT, em comparação com 18,74 minutos para aqueles que não contavam com essa assistência, o que representa uma redução de 6,78% no tempo de diagnóstico (Ezhov M et al., 2021). Esse ganho de tempo pode ter um impacto significativo na prática clínica diária, onde a eficiência é essencial para tratar um maior número de pacientes mantendo um alto nível de qualidade nos cuidados.

No entanto, limitações da IA no Diagnocat e na análise CBCT são evidentes em casos mais complexos. Conforme discutido em uma revisão sistemática, embora a IA seja eficaz na maioria dos casos, sua performance diminui em contextos raros, como a deteção de lesões peri-apicais específicas ou de dentes com anatomias incomuns, como cinco canais ou quatro raízes. Essas falhas podem ser atribuídas à falta de representação adequada

desses casos nos conjuntos de dados utilizados para o treinamento da IA (Badr FF & Jadu FM 2022). Isso reforça a necessidade de melhorar e expandir as bases de dados de treinamento da IA para garantir maior precisão em casos raros e complexos, uma limitação também observada no Diagnocat (Ezhov M et al., 2021).

2. A inteligência artificial no reconhecimento de implantes dentários

A aplicação da inteligência artificial no reconhecimento de implantes dentários tem demonstrado resultados significativos, especialmente com o uso de redes neurais convolutivas (CNN) para a análise de imagens radiográficas peri-apicais e panorâmicas. De acordo com uma revisão sistemática recente, os modelos de IA alcançam uma precisão que varia entre 93,8% e 98% na identificação dos tipos de implantes dentários. Esses modelos processam as imagens radiográficas bidimensionais, que incluem tanto radiografias peri-apicais quanto panorâmicas, para identificar com precisão o tipo de implante, tornando-se uma ferramenta essencial na prática clínica.

A acurácia desses modelos varia em função da qualidade e do tipo de imagem radiográfica utilizada, sendo observado que o uso combinado de radiografias peri-apicais e panorâmicas melhora ainda mais a sensibilidade e especificidade do reconhecimento. Isso é particularmente útil em casos onde o implante não é claramente visível ou quando há sobreposições com outras estruturas anatômicas na imagem. Além disso, essas ferramentas são de grande valor em situações onde as informações sobre o histórico do implante são limitadas ou ausentes, como quando o paciente foi tratado por outro profissional, ou em clínicas que atendem a uma alta rotatividade de pacientes.

Outro ponto importante é que, embora a maioria dos estudos use imagens bidimensionais, há um crescente interesse na utilização de tomografia computadorizada de feixe cônico (CBCT) para melhorar a precisão dos modelos de IA, uma vez que as imagens tridimensionais oferecem mais detalhes sobre a estrutura do implante e sua relação com o osso circundante. Apesar do potencial dos modelos baseados em IA, o desenvolvimento desses sistemas ainda enfrenta desafios relacionados à variabilidade nos tipos de implantes e à ausência de bancos de dados amplos e padronizados que possam treinar os algoritmos para reconhecer uma maior diversidade de implantes disponíveis no mercado (Revilla-León M et al., 2023).

Em suma, a IA não só melhora a eficiência e precisão no reconhecimento dos implantes dentários, mas também oferece suporte valioso para profissionais menos experientes ou em contextos onde o histórico do paciente está incompleto. Ao facilitar a identificação dos implantes, esses sistemas contribuem para a continuidade do cuidado e otimização do tratamento dentário pós-operatório.

3. A inteligência artificial no planejamento de colocação de implantes dentários

Além de seu uso na radiologia, a inteligência artificial desempenha um papel cada vez mais central no planejamento de implantes dentários. O planejamento de implantes é uma etapa crucial que requer uma compreensão profunda das estruturas anatômicas do paciente e precisão na colocação dos implantes para garantir seu sucesso a longo prazo. Nesse contexto, a IA é utilizada para automatizar certas etapas do processo e melhorar a precisão das intervenções.

A IA, especialmente combinada com tecnologias como a CBCT e os scanners intraorais (IOS), permite a criação de modelos 3D das estruturas dentárias e ósseas, facilitando um planejamento mais preciso das intervenções cirúrgicas (Elgarba BM et al.,2024). Esses modelos 3D permitem uma melhor visualização dos pontos anatômicos críticos e ajudam os clínicos a planejar a posição ideal dos implantes, levando em consideração a densidade óssea e a anatomia do paciente.

Embora a IA permita automatizar certas etapas do planejamento, como a segmentação das estruturas ósseas e dentárias, ainda não existe software capaz de automatizar completamente o processo. Atualmente, alguns sistemas podem realizar a colocação virtual dos implantes, mas o fluxo de trabalho global permanece em grande parte manual (Elgarba BM et al.,2024). Isso significa que, embora a IA possa facilitar algumas partes do processo, a supervisão humana ainda é necessária para garantir a precisão e personalização dos tratamentos.

A automatização de etapas críticas, como a segmentação dos tecidos ou a criação de modelos virtuais dos pacientes, apresenta vantagens consideráveis. Por exemplo, permite reduzir erros humanos, melhorar a consistência dos resultados e personalizar os tratamentos para cada paciente. Isso é particularmente verdadeiro no contexto do planejamento de implantes sob medida, onde a IA pode ajudar a conceber implantes

perfeitamente adaptados à morfologia do paciente ou a usar malhas de titânio personalizadas para a regeneração óssea (Elgarba BM et al.,2024).

4. Comparação dos benefícios da IA no diagnóstico e planeamento de implantes

A inteligência artificial desempenha um papel crescente tanto no diagnóstico radiológico quanto no planeamento de implantes dentários. Em ambos os domínios, a IA permite melhorar a precisão e acelerar o processo, seja na análise de imagens CBCT ou no planeamento pré-cirúrgico. No entanto, os desafios e limitações são diferentes em cada caso. No caso do Diagnocat, embora o desempenho seja impressionante, algumas configurações raras ou complexas ainda são difíceis de diagnosticar. Isso destaca a necessidade de melhorar os algoritmos para lidar melhor com casos excepcionais e garantir precisão ideal em todas as situações (Ezhov M et al., 2021). No planeamento de implantes dentários, embora a IA permita automatizar certas etapas, a automação completa do processo ainda é um objetivo a ser alcançado. No entanto, os progressos já realizados oferecem benefícios significativos para os clínicos (Elgarba BM et al., 2024).

A inteligência artificial, especialmente por meio de sistemas como o Diagnocat, representa um avanço significativo no campo da odontologia moderna. Ao melhorar a precisão dos diagnósticos baseados em imagens CBCT, permite que os dentistas identifiquem patologias dentárias, como cáries e lesões periapicais, de forma mais eficaz, reduzindo os erros de diagnóstico. O Diagnocat também acelera o processo de análise de imagens, contribuindo para uma gestão mais eficiente dos pacientes e uma melhor qualidade dos cuidados (Ezhov M et al., 2021).

Além disso, a evolução da IA abriu novas perspectivas no reconhecimento de implantes dentários, facilitando a identificação dos tipos de implantes e otimizando o acompanhamento pós-operatório, especialmente quando o histórico do paciente está incompleto (Revilla-León M et al., 2023). Em paralelo, a IA melhora o planeamento de implantes, permitindo uma melhor visualização das estruturas anatómicas, aumentando a precisão das intervenções cirúrgicas e reduzindo os erros humanos (Elgarba BM et al., 2024).

4.1 Impactos adicionais da IA no diagnóstico e planeamento de implantes dentários

Além dos avanços já mencionados no diagnóstico e planeamento de implantes, a inteligência artificial tem se mostrado uma ferramenta essencial em várias etapas da implantologia. Estudos recentes destacam a aplicação da IA na análise de imagens CBCT, onde algoritmos de aprendizagem profunda (CNN) permitem detetar com precisão estruturas anatômicas críticas, como o canal mandibular e os seios maxilares, facilitando a identificação de riscos cirúrgicos e otimizando o posicionamento dos implantes. Embora algumas limitações ainda sejam observadas, como a necessidade de melhorar a precisão em medições ósseas complexas, a IA tem mostrado resultados promissores na redução do tempo de planeamento e aumento da segurança nos procedimentos (Altalhi et al., 2023).

Outro benefício significativo da IA é sua capacidade de reconhecer e classificar diferentes sistemas de implantes, um aspeto crucial para tratamentos de seguimento quando o histórico completo do paciente não está disponível. Algoritmos baseados em redes neurais conseguem identificar características específicas dos implantes a partir de radiografias, minimizando o risco de erro humano. No entanto, a precisão dessas ferramentas ainda depende de grandes bases de dados de imagens, e a criação de modelos regionais adaptados à diversidade de implantes disponíveis é uma prioridade para aumentar ainda mais sua eficácia (Altalhi et al., 2023).

Por fim, a IA abre novas possibilidades no desenvolvimento de designs de implantes, onde a análise por elementos finitos (FEA) combinada com modelos de IA pode otimizar o design dos implantes para minimizar o estresse ósseo, aumentando as taxas de sucesso dos procedimentos. Apesar de ainda serem necessários mais estudos clínicos, essas inovações já apontam para um futuro onde o uso da IA tornará os tratamentos de implante dentário mais personalizados e eficientes (Altalhi et al., 2023).

No entanto, novas técnicas complementares também estão a ser desenvolvidas para melhorar a precisão no planeamento de implantes, e um exemplo disso é o uso da tomografia computadorizada de feixe cónico (CBCT) para verificar a precisão dos guias cirúrgicos fabricados antes da cirurgia. Zhang et al. (2023) propõem uma abordagem inovadora que consiste em reconstruir as posições dos implantes planeados a partir de imagens CBCT, permitindo que os clínicos recalculassem as coordenadas dos implantes e comparassem com o design original do guia. Esta técnica oferece uma camada adicional de segurança e precisão, especialmente em casos complexos ou quando a estabilidade do guia é incerta. Embora o uso de uma nova CBCT aumente a exposição à radiação, esta

técnica é justificada quando se trata de garantir a segurança e a precisão da cirurgia. A metodologia pode complementar as inovações trazidas pela IA, garantindo que o planeamento dos implantes seja o mais exato possível (Zhang et al., 2023).

No entanto, apesar desses progressos notáveis, ainda existem desafios. A automação completa do processo de planeamento de implantes ainda não foi alcançada, e algumas configurações raras ou complexas continuam difíceis de diagnosticar com os sistemas atuais. Portanto, é necessário continuar a melhorar os algoritmos de IA para melhor lidar com esses casos excepcionais e alcançar uma automação completa (Ezhov M et al., 2021; Elgarba BM et al., 2024).

No geral, a inteligência artificial já demonstrou sua capacidade de transformar significativamente a prática odontológica, tanto no campo do diagnóstico quanto no planeamento dos tratamentos. No entanto, são necessários desenvolvimentos adicionais para superar as limitações atuais e realizar todo o potencial da IA na odontologia (Ezhov M et al., 2021; Elgarba BM et al., 2024).

5. Implicações éticas da inteligência artificial na medicina dentária

A introdução da inteligência artificial (IA) na medicina dentária, embora melhore a eficiência e a precisão dos diagnósticos, levanta vários desafios éticos. Um dos aspetos mais preocupantes é a confidencialidade dos dados dos pacientes. Os sistemas de IA necessitam de grandes quantidades de dados para serem treinados e funcionarem corretamente, o que levanta questões sobre como esses dados são recolhidos, armazenados e protegidos. Além disso, a responsabilidade em caso de erros de diagnóstico ou de tratamento é uma questão essencial. Se uma IA gerar um diagnóstico incorreto, é necessário clarificar quem é responsável: o profissional que utiliza a ferramenta ou os desenvolvedores do algoritmo. Adicionalmente, a automatização crescente pode potencialmente afetar a relação entre o paciente e o profissional, desumanizando certos aspetos essenciais dos cuidados de saúde, como a empatia e a compreensão contextual do paciente. Por fim, é importante considerar os riscos de enviesamento nos algoritmos, que podem influenciar negativamente os diagnósticos se não forem treinados com dados suficientemente diversificados e representativos (Paridhi Agrawal & Pradnya Nikhade, 2022).

A automação introduzida pela IA também pode criar uma dependência excessiva da tecnologia, o que poderia levar à redução do papel crítico do profissional na validação dos diagnósticos. Tal como destacado, é crucial que o profissional continue a desempenhar o papel de tomador de decisão final, utilizando o apoio da IA como uma ferramenta auxiliar, mas sem abdicar do seu julgamento clínico. Esta questão de quem detém o controle sobre o processo de diagnóstico é central para manter a integridade ética e a confiança na relação entre o profissional e o paciente (RD Maart & Riaan Mulder, 2024). Outro ponto relevante é a forma como a utilização crescente da IA pode, por vezes, reduzir a comunicação direta com o paciente, levando a uma diminuição dos cuidados humanizados. Esta falta de interação pode não só prejudicar a qualidade dos cuidados, mas também afetar a capacidade de personalizar o tratamento com base nas necessidades específicas de cada paciente (RD Maart & Riaan Mulder, 2024).

6. Perspetiva futura

Depois de utilizar o software Diagnocat e fazer alguma pesquisa, descobri um avanço revelador na utilização da inteligência artificial para implantes.

Num estudo publicado em junho de 2024, foi avaliada a eficácia de uma ferramenta de inteligência artificial (IA), denominada *Relu Creator*, para o planeamento automatizado de implantes dentários, em comparação com os métodos de planeamento realizados por especialistas humanos. Este estudo teve como objetivo mensurar a qualidade, a aceitação clínica, a eficiência temporal e a consistência da IA em casos de substituição de molares e pré-molares mandibulares.

A integração da IA no planeamento de implantes dentários apresenta perspectivas promissoras para o futuro da implantologia. Neste estudo, a IA demonstrou uma qualidade de planeamento comparável à dos especialistas humanos, ao mesmo tempo que superou estes em termos de rapidez e consistência. A redução significativa no tempo de planeamento, associada a uma precisão constante, sugere que a IA pode não só reduzir a carga de trabalho dos clínicos, como também melhorar a padronização dos procedimentos. Esta característica tem o potencial de otimizar os fluxos de trabalho clínicos e de reduzir a variabilidade entre diferentes praticantes, uma questão recorrente na prática clínica.

Adicionalmente, uma das principais vantagens destacadas no estudo foi a maior consistência apresentada pelos planos de implantes gerados pela IA. Ao contrário da metodologia humana, que pode ser influenciada por fatores subjetivos, tais como a experiência, a formação ou até o cansaço, a IA manteve uma precisão constante, como demonstrado pela ausência de desvios significativos nos planos reprodutíveis. Esta fiabilidade acrescida abre a possibilidade de uma aplicação mais alargada da IA em casos clínicos mais complexos, que muitas vezes requerem intervenções multidisciplinares. A automação do planeamento, neste contexto, pode simplificar a colaboração entre cirurgiões, radiologistas e protésicos, fornecendo uma base estandardizada para a tomada de decisões clínicas de forma mais rápida e segura.

Contudo, apesar dos resultados encorajadores, este estudo sublinha a necessidade de futuras investigações que explorem a aplicação da IA a casos clínicos mais desafiantes e a ambientes clínicos diversificados. Além disso, será crucial integrar dados adicionais, como a qualidade do osso ou fatores biomecânicos específicos de cada paciente, para permitir um refinamento dos algoritmos utilizados. Esta evolução garantiria que as ferramentas de IA possam abranger todas as necessidades clínicas no domínio da implantologia, otimizando simultaneamente a eficiência e a segurança dos tratamentos.

Em conclusão, apesar de a IA aplicada ao planeamento de implantes dentários ainda se encontrar nos estágios iniciais de desenvolvimento, os resultados deste estudo indicam que a tecnologia tem o potencial de transformar significativamente a área. A automatização de etapas críticas no processo de planeamento, juntamente com a sua eficiência superior e a redução da variabilidade nos resultados clínicos, reforçam o papel promissor da IA no futuro da implantologia.

Inteligência Artificial para a análise automática de imagens CBCT/ TC. Aplicações no planeamento de implantes dentários. Estudo comparativo de um caso clínico

V. CONCLUSÃO

O objetivo principal desta tese, que consistia em comparar as decisões e os resultados da colocação de implantes dentários orientada por IA com aqueles realizados por um profissional sem recurso à IA, não foi alcançado devido às limitações atuais dos softwares de IA, incapazes de garantir um planeamento totalmente automatizado. Face a esta dificuldade, foi estabelecido um objetivo secundário: avaliar as capacidades e limitações da IA na análise de imagens CBCT para o planeamento de implantes dentários, utilizando o software Diagnocat como referência, o que permitiu constatar que a IA, embora eficaz para a segmentação das estruturas, apresenta limitações técnicas para um plano de tratamento completo.

A inteligência artificial (IA) representa um progresso significativo no campo da odontologia, oferecendo soluções inovadoras para a segmentação automática das estruturas dentárias e maxilofaciais. Ferramentas como o Diagnocat ilustram perfeitamente esta tendência, pois permitem uma segmentação precisa de diversos elementos anatómicos, como dentes, maxilas e seios, facilitando assim a interpretação radiológica pelos profissionais de saúde. Graças aos seus algoritmos avançados, o Diagnocat oferece uma visualização detalhada que melhora a compreensão das relações anatómicas complexas, tornando a IA indispensável para diagnósticos fiáveis e para o planeamento de tratamentos.

Uma das principais forças da IA, como demonstrado pelo Diagnocat, reside na sua capacidade de simplificar o fluxo de trabalho clínico. Ao reduzir o tempo necessário para interpretar as imagens radiológicas, os profissionais de saúde podem concentrar-se mais nos aspetos críticos da gestão dos pacientes. Além disso, a possibilidade de personalizar as visualizações das estruturas anatómicas de acordo com as necessidades específicas de cada caso, como permite o Diagnocat, oferece uma flexibilidade valiosa, permitindo uma atenção direcionada a elementos particulares como dentes ou estruturas ósseas.

Contudo, apesar destas promissoras inovações, a inteligência artificial apresenta ainda certas limitações. O primeiro objetivo deste estudo não foi completamente alcançado devido a estas limitações técnicas: embora a IA seja capaz de segmentar as estruturas, o planeamento totalmente automatizado dos implantes dentários continua a ser um desafio. Esta situação destaca a importância da experiência clínica no processo de tomada de decisão. Além disso, a necessidade de uma avaliação aprofundada por parte dos

profissionais de saúde em relação a fatores como a densidade óssea e a carga oclusal ideal mostra que a IA não substitui a competência humana, devendo ser encarada como uma ferramenta complementar.

As perspetivas futuras para a IA na odontologia são promissoras. É importante destacar a rapidez com que as tecnologias de inteligência artificial estão a evoluir. Ao utilizarmos o software Diagnocat nesta tese, não tínhamos conhecimento dos últimos avanços que surgem continuamente neste domínio. Em particular, a evolução recente das ferramentas de IA, ilustrada pelos progressos de um software belga mencionado num artigo de junho de 2024, mostra que a medicina dentária, e mais especificamente o planeamento de implantes, poderá em breve beneficiar de uma automação completa pela IA. Embora sejam visíveis os avanços neste domínio, nomeadamente em termos de precisão e eficácia, a plena implementação destas tecnologias ainda exigirá investigações aprofundadas e validações clínicas. Isto é particularmente relevante em casos complexos, como demonstrou o Diagnocat perante as dificuldades de análise automática. Além disso, a exploração das possibilidades oferecidas pela segmentação automática das imagens continua em desenvolvimento, sendo essencial continuar a avaliar a integração da IA nestes processos para otimizar os resultados clínicos.

Em conclusão, a inteligência artificial já estabeleceu o seu lugar na odontologia moderna, e o seu potencial continua a crescer. Softwares como o Diagnocat provaram o seu valor ao melhorar o diagnóstico e a análise radiológica. No entanto, é crucial reconhecer a necessidade de uma colaboração estreita entre a tecnologia e os profissionais de saúde. À medida que a IA evolui, é provável que transforme ainda mais a prática odontológica, tornando os procedimentos mais eficazes e precisos. Além disso, já existem sistemas de IA para o reconhecimento de implantes, facilitando o trabalho dos profissionais ao permitir a deteção precisa da presença e posição dos implantes sem necessidade de os conhecer previamente num CBCT. Esta evolução mostra como a IA pode otimizar o planeamento cirúrgico, prevendo as interações entre os implantes e as estruturas anatómicas circundantes, revolucionando assim a forma como os procedimentos de implantação são realizados.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agrawal, P., & Nikhade, P. (2022). Artificial intelligence in dentistry: Past, present, and future. *Cureus*, *14*(7), e27405. <https://doi.org/10.7759/cureus.27405>

Altalhi, A. M., Alharbi, F. S., Alhodaithy, M. A., Almarshedy, B. S., Al-saaib, M. Y., Al jfshar, R. M., Aljohani, A. S., Alshareef, A. H., Muhayya, M., & AL-harbi, N. H. (2023). The impact of artificial intelligence on dental implantology: A narrative review. *Cureus*, *15*(10), e47941. <https://doi.org/10.7759/cureus.47941>

Badr, F. F., & Jadu, F. M. (2022). Performance of artificial intelligence using oral and maxillofacial CBCT images: A systematic review and meta-analysis. *Nigerian Journal of Clinical Practice*, *25*(11), 1918–1927. https://doi.org/10.4103/njcp.njcp_394_22

De Angelis, F., Pranno, N., Franchina, A., Di Carlo, S., Brauner, E., Ferri, A., Pellegrino, G., Grecchi, E., Goker, F., & Stefanelli, L. V. (2022). Artificial intelligence: A new diagnostic software in dentistry: A preliminary performance diagnostic study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(3), 1728. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031728>

Ding, H., Wu, J., Zhao, W., Matinlinna, J. P., Burrow, M. F., & Tsoi, J. K. H. (2023). Artificial intelligence in dentistry—A review. *Frontiers in Dental Medicine*, *4*, Article 1085251. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2023.1085251>

Elgarba, B. M., Fontenele, R. C., Mangano, F., & Jacobs, R. (2024). Novel AI-based automated virtual implant placement: Artificial versus human intelligence. *Journal of Dentistry*, *147*, 105146. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105146>

Elgarba, B. M., Fontenele, R. C., Tarce, M., & Jacobs, R. (2024). Artificial intelligence serving pre-surgical digital implant planning: A scoping review. *Journal of Dentistry*, *143*, Article 104862. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.104862>

Ezhov, M., Gusarev, M., Golitsyna, M., Yates, J. M., Kushnerev, E., Tamimi, D., Aksoy, S., Shumilov, E., Sanders, A., & Orhan, K. (2021). Clinically applicable artificial intelligence system for dental diagnosis with CBCT. *Scientific Reports*, *11*, Article 15006. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-94093-9>

- Gillot, M., Miranda, F., Baquero, B., Ruellas, A., Gurgel, M., Al Turkestani, N., Anchling, L., Hutin, N., Biggs, E., Yatabe, M., Paniagua, B., Fillion-Robin, J. C., Allemang, D., Bianchi, J., Cevidanes, L., & Prieto, J. C. (2023). Automatic landmark identification in cone-beam computed tomography. *Orthodontics & Craniofacial Research*, 26(4), 560-567. <https://doi.org/10.1111/ocr.12642>
- Hung, K., Montalvao, C., Tanaka, R., Kawai, T., & Bornstein, M. M. (2020). The use and performance of artificial intelligence applications in dental and maxillofacial radiology: A systematic review. *Dentomaxillofacial Radiology*, 49, Article 20190107. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20190107>
- Kelly, B. S., Judge, C., Bollard, S. M., Clifford, S. M., Healy, G. M., Aziz, A., Mathur, P., Islam, S., Yeom, K. W., Lawlor, A., & Killeen, R. P. (2022). Radiology artificial intelligence: A systematic review and evaluation of methods (RAISE). *European Radiology*, 32, 7998–8007. <https://doi.org/10.1007/s00330-022-08784-6>
- Maart, R., & Mulder, R. (2024). Ethical considerations for artificial intelligence in dentistry. *South African Dental Journal*, 79(5), 260-262. <https://doi.org/10.17159/sadj.v79i05.18355>
- Oh, S., Kim, Y. J., Kim, J., Jung, J. H., Lim, H. J., Kim, B. C., & Kim, K. G. (2023). Deep learning-based prediction of osseointegration for dental implants using plain radiography. *BMC Oral Health*, 23, Article 208. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02921-3>
- Ossowska, A., Kusiak, A., & Świetlik, D. (2022). Artificial intelligence in dentistry—Narrative review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, Article 3449. <https://doi.org/10.3390/ijerph19063449>
- Putra, R. H., Doi, C., Yoda, N., Astuti, E. R., & Sasaki, K. (2022). Current applications and development of artificial intelligence for digital dental radiography. *Dentomaxillofacial Radiology*, 51(1), Article 20210197. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20210197>
- Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Vyas, S., Barmak, B. A., Galluci, G. O., Att, W., & Krishnamurthy, V. R. (2023). Artificial intelligence applications in implant dentistry: A systematic review. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 129(2), 293–300. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.05.008>
- Schulze, D., Häußermann, L., Ripper, J., & Sottong, T. (2024). Comparison between observer-based and AI-based reading of CBCT datasets: An interrater-reliability

study. *The Saudi Dental Journal*, 36, 291–295.
<https://doi.org/10.1016/j.sdentj.2023.11.001>

Schwendicke, F., Samek, W., & Krois, J. (2020). Artificial intelligence in dentistry: Chances and challenges. *Journal of Dental Research*, 99(7), 769–774.
<https://doi.org/10.1177/0022034520915714>

Singh, S. P., Wang, L., Gupta, S., Goli, H., Padmanabhan, P., & Gulyás, B. (2020). 3D deep learning on medical images: A review. *Sensors*, 20(18), 5097.
<https://doi.org/10.3390/s20185097>

Thurzo, A., Strunga, M., Urban, R., Surovková, J., & Afrashtehfar, K. I. (2023). Impact of artificial intelligence on dental education: A review and guide for curriculum update. *Education Sciences*, 13, Article 150.
<https://doi.org/10.3390/educsci13020150>

Zhang, R., Li, S., & Liu, Y. (2023). Assessing the accuracy of fabricated implant surgical guides by reconstructing the implant position based on cone beam computed tomography images: A dental technique. *Journal of Prosthetic Dentistry*, 129(2), 267–270. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2021.05.005>

Inteligência Artificial para a análise automática de imagens CBCT/ TC. Aplicações no planeamento de implantes dentários. Estudo comparativo de um caso clínico

ANEXOS

Anexo A. Consentimento informado

[Cabinet Dentaire Dr.Graziani]

Gabinete Dentário do Dr. Jean Noel Graziani
28 bis Cours PAOLI
20250 Corte
04 95 61 08 43
jean-noel.graziani@wanadoo.fr

Data: 27/06/2024

Objeto: Autorização de utilização dos dados e imagens da paciente Marie Piferini, com o seu consentimento, para a elaboração de uma tese de doutoramento.

À atenção de :

Marie Piferini
20231 Venaco (Córsega,

França) Cara Senhora

Piferini,

Escrevemos para solicitar formalmente a sua autorização para utilizar os seus dados médicos e imagens de raios X no âmbito da preparação de uma tese de doutoramento da estudante Pauline Lapina, autorizada pelo nosso consultório dentário.

Ao assinar esta carta, dá o seu consentimento ao Cabinet Dentaire du Dr. Jean Noel Graziani e à estudante Pauline Lapina para :

1. Utilizar os seus dados médicos, incluindo informações sobre o seu tratamento, para redigir a tese dentária.
2. Utilizar as imagens radiográficas tiradas antes, durante e após o tratamento para ilustrar a tese, garantindo o anonimato e a confidencialidade dos seus dados pessoais.

Gostaríamos de lhe garantir que todas as informações serão tratadas com a máxima confidencialidade e que apenas pessoas autorizadas terão acesso aos seus dados. Além disso, nenhuma informação pessoal identificável será partilhada sem o seu consentimento explícito.

Se concorda com os termos da presente autorização, queira assinar e datar a presente carta no espaço abaixo indicado.

Obrigado pela vossa confiança e colaboração. Com os melhores cumprimentos

Dr. Jean Noel Graziani
Assinatura:



Consultório dentário Dr. Jean
Noel Graziani

Acordo com o doente

Eu, abaixo assinada, Marie Piferini, autorizo o Cabinet Dentaire do Dr. Jean Noel Graziani e a estudante Pauline Lapina a utilizar os meus dados médicos e as minhas imagens radiográficas, de acordo com as condições acima indicadas, para a elaboração da tese de doutoramento.

Assinatura : _____

Data : _____ 27/06/2024

Inteligência Artificial para a análise automática de imagens CBCT/ TC. Aplicações no planeamento de implantes dentários. Estudo comparativo de um caso clínico

Anexo B. Parecer Comissão de Ética



UNIVERSIDADE FERNANDO PESSOA

Exma. Senhora
Prof. Doutora Sandra Gavinha
Diretora da FCS

Nº	Data
FCS/MMED - 597/24-2	11 de Julho de 2024

Exma. Senhora Professora Doutora,

A Comissão de Ética analisou a ressubmissão do projeto apresentado por Pauline Lapina, intitulado "Um sistema de inteligência artificial para a análise automática de imagem CBCT/TC: aplicações no planeamento de implantes dentários", a realizar no âmbito do Mestrado Integrado em Medicina Dentária.

O objetivo do estudo é realçar a utilização de uma Inteligência Artificial em imagens existentes para comparar a programação e o resultado de implantes por um dentista (rapidez, precisão, escolha do material).

Todos os esclarecimentos solicitados foram entregues.

Deste modo, a Comissão de Ética considera nada haver a opor quanto à realização deste projeto.

Com os melhores cumprimentos,

A Presidente da
Comissão de Ética da UFP


Inês Lopes Cardoso



FUNDAÇÃO ENSINO E CULTURA "FERNANDO PESSOA"

NIPC. 502 057 602 - Reg. Comercial nº 26 Conservatória do Registo Comercial do Porto

FACULDADE DE CIÊNCIAS HUMANAS E SOCIAIS
Praça 9 de Abril, 349 • 4249-004 Porto - Portugal
T. +351 22 507 1300* • <https://www.ufp.pt>
geral@fundacaofermandopessoa.pt

FACULDADE DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
Rua Carlos de Maia, 296 • 4200-150 Porto - Portugal
T. +351 22 507 4630* • <https://www.ufp.pt>
geral@fundacaofermandopessoa.pt

FACULDADE DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Praça 9 de Abril, 349 • 4249-004 Porto - Portugal
T. +351 22 507 1300* • <https://www.ufp.pt>
geral@fundacaofermandopessoa.pt

* (chamada para a rede fixa nacional)

Inteligência Artificial para a análise automática de imagens CBCT/ TC. Aplicações no planeamento de implantes dentários. Estudo comparativo de um caso clínico

Autoriza-se
↓
42-7-24