

RESSALVA

Atendendo a solicitação do(a) autor(a), o texto completo desse trabalho será disponibilizado no repositório a partir de 26/02/2027.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

RODRIGO CLAUDINO DE CASTRO

**DETERMINAÇÃO DA CURVA S-N DAS CAMADAS 5Y-PSZ,
FAIXA DE TRANSIÇÃO E 4Y-TZP DE UMA ZIRCÔNIA
MULTICAMADAS E APLICAÇÃO EM MODELO MATEMÁTICO
PARA USO EM ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS**

RODRIGO CLAUDINO DE CASTRO

**DETERMINAÇÃO DA CURVA S-N DAS CAMADAS 5Y-PSZ, FAIXA DE
TRANSIÇÃO E 4Y-TZP DE UMA ZIRCÔNIA MULTICAMADAS E APLICAÇÃO EM
MODELO MATEMÁTICO PARA USO EM ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de São José dos Campos, como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE, pelo Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS APLICADAS À SAÚDE BUCAL.

Área: Prótese dentária. Linha de pesquisa: Comportamento Mecânico de Materiais e Novas Tecnologias em Odontologia.

Orientador: Prof. Titular Alexandre Luiz Souto Borges

São José dos Campos-SP

2025

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2025]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Castro, Rodrigo Claudino de

Determinação da curva S-N das camadas 5Y-PSZ, faixa de transição e 4Y-TZP de uma zircônia multicamadas e aplicação em modelo matemático para uso em análise por elementos finitos / Rodrigo Claudino de Castro. - São José dos Campos : [s.n.], 2025.

73 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Ciências Aplicadas à Saúde Bucal - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2025.

Orientador: Alexandre Luiz Souto Borges.

1. Fadiga. 2. Cerâmica. 3. Propriedades mecânicas. 4. Zircônia. 5. Modelos computacionais. I. Borges, Alexandre Luiz Souto, orient. II. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. III. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. IV. Universidade Estadual Paulista (UNESP). V. Título.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Titular Alexandre Luiz Souto Borges (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus São José dos Campos-SP

Profa. Dra. Renata Marques de Melo Marinho

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus São José dos Campos-SP

Profa. Dra. Jéssica Dias Santos

Universidade São Francisco (USF)

Campus Bragança Paulista-SP

São José dos Campos-SP, 17 de janeiro de 2025.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha queridíssima esposa, **Ana Castro**, alicerce da nossa família. **TE AMO** imensamente e sou grato por cada empurrão, apoio e incentivo que tens me dado ao longo da minha jornada.

Aos meus **Anjos**: à minha pequena, que, de longe, cuida da sua família, e ao que, em breve, nos presenteará com uma maravilhosa e aventureira visita. Amo vocês para sempre.

E, por último, dedico este trabalho ao senhor Rodrigo Claudino de Castro, ou seja, a mim mesmo. Pois, nas palavras puras, belas e verdadeiras do singelo ditado popular: “O que seria de mim, se não fosse eu?”

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço as figuras celestiais que habitam meu coração e que tenho profundo respeito e admiração, fazem de mim um ser cada dia mais pensante. Os Senhores me deram forças para mais essa conquista no percorrer desses anos de muito estudo e trabalho. Agradeço principalmente pelas pequenas conquistas e pelos amigos maravilhosos.

Em especial a minha querida mamãe, senhora **Claudia Eliana**, me sinto sempre em casa quando penso na senhora.

Agradeço a toda minha família por sempre estarem ao meu lado. A minha “mamãe querida” (alguns entenderão rsrsrs), senhora **Claudia Eliana**, ao meu pai, senhor **Modesto**, meus irmãos, **Aline e Patrick**, aos meus sobrinhos, **Gabriel, Raul** e o novato **Davi** (vamos brincar de lutinha para comemorar) e para minha queridíssima esposa que tem me aguentado um “tantão”, beijo **Ana**.

Aos amigos que cativei nesta jornada, em especial a **Ana Paula**, companheira de orientação. Foram dois anos de companheirismo com todos. Pessoas maravilhosas que levarei para a vida toda. Foi um privilégio!!!!

Em especial ao meu orientador, agora Professor Titular **Alexandre Luiz Souto Borges**. Agradeço por ter me proporcionado a capacidade de realizar um sonho. Obrigado por tudo professor, não sabe como estou feliz em me tornar uma pequena parte de sua trajetória.

Aos professores da prótese do Programa de Pós-Graduação em Ciências Aplicadas a Saúde Bucal, sou grato pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar melhor desempenho no meu processo de formação acadêmica ao longo desta jornada.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para essa caminhada, o meu muito obrigado!

"Apenas as memórias de um sentimento permanecem, lembranças de um riso nunca visto, mas guardado na alma. E nós, pequeno mundo de dois, seguimos aqui, acolhendo a saudade e buscando sentido nos mistérios da vida. Pois, ainda que a flor tenha caído cedo demais, tivemos o privilégio de ouvir seu coração bater, mesmo que por um instante". Rodrigo Castro

RESUMO

Castro, RC. Determinação da curva S-N das camadas 5Y-PSZ, faixa de transição e 4Y-TZP de uma zircônia multicamadas e aplicação em modelo matemático para uso em análise por elementos finitos [dissertação]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2025.

Este estudo tem como objetivo determinar a curva S-N das camadas de zircônia no disco IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic, da empresa Ivoclar Vivadent, utilizando ensaios laboratoriais de fadiga e validar um modelo matemático, baseado na análise por elementos finitos (FEA), capaz de apresentar dados similares aos testes *in vitro*. Os testes foram conduzidos conforme as normas ASTM E 739 – 91 (atualizada em 1998) e ISO 6872/2016. As três camadas dos discos foram separadas em grupos experimentais, sendo: Grupo 1 - 5Y-PSZ, Grupo 2 - Faixa de Transição e Grupo 3 - 4Y-TZP. Trinta e três discos de 14 x 1,2 mm foram obtidos para cada camada, sendo três amostras de cada grupo destinadas ao teste monotônico e o restante subdividido em seis subgrupos (n=5), de acordo com o nível de carga aplicada nos testes de fadiga cíclica. A análise estatística dos dados de tensão e número de ciclos foi realizada por regressão linear, utilizando o método dos mínimos quadrados. Cada grupo foi submetido à ciclagem até que atingisse sua “vida infinita”, ou seja, um milhão de ciclos sem falha. Após a coleta dos dados experimentais, um disco semelhante ao utilizado nos testes *in vitro* foi modelado no software CAD Rhinoceros® e exportado para o CAE Ansys®, onde foram realizadas as simulações pela FEA. A validação do modelo foi conduzida comparando os resultados da curva S-N experimental com os dados simulados por testes estatísticos não paramétricos de correlação, concordância e comparação. A vida infinita dos três grupos foi atingida com uma força de 188N, representando 33% da carga máxima para o Grupo 1, 27% para o Grupo 2 e 25% para o Grupo 3. Ao alimentar o software para FEA, os resultados mostraram forte correlação entre os métodos *in vitro* e *in silico*. O teste de Spearman indicou correlação significativa em todos os casos, enquanto o teste de Wilcoxon apresentou $p > 0,5$, não evidenciando diferenças significativas entre os métodos. O teste de Bland-Altman indicou 95% de concordância entre os dois métodos nos três grupos. Assim, foi possível validar a hipótese de que não há diferença significativa entre os resultados *in vitro* e *in silico*. Além disso, a FEA demonstrou ser uma alternativa eficiente e de menor custo para prever a “vida infinita” do material, reduzindo a necessidade de novos testes laboratoriais. Os achados deste estudo reforçam a relevância da curva S-N na análise do comportamento cíclico da fadiga de materiais dentários. A validação do modelo matemático amplia possibilidades clínicas, permitindo ajustes mais precisos em estruturas protéticas complexas, otimizando os recursos sem comprometer a confiabilidade do material.

Palavras-chave: fadiga; cerâmica; propriedades mecânicas; zircônia; modelos computacionais.

ABSTRACT

Castro RC. S-N curve determination of 5Y-PSZ, transition zone, and 4Y-TZP layers in a multilayer zirconia and its application in a mathematical model for finite element analysis [dissertation]. São José dos Campos (SP): São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2025.

This study aims to determine the S-N curve of the zirconia layers in the IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic disc, manufactured by Ivoclar Vivadent, using laboratory fatigue tests and to validate a mathematical model based on finite element analysis (FEA) capable of providing results similar to *in vitro* tests. The tests were conducted following the ASTM E 739 – 91 standard (updated in 1998) and ISO 6872/2016. The three layers of the discs were separated into experimental groups: Group 1 - 5Y-PSZ, Group 2 - Transition Layer, and Group 3 - 4Y-TZP. Thirty-three 14 × 1.2 mm discs were obtained for each layer, with three samples from each group allocated to monotonic testing, while the remaining samples were subdivided into six subgroups (n=5) according to the applied force for cyclic fatigue testing. Statistical analysis of stress and cycle number data was performed using linear regression with the least squares method. Each group underwent cyclic loading until one of them reached its “infinite life,” defined as one million cycles without failure. After collecting the experimental data, a disc similar to the one used in the *in vitro* tests was modeled in CAD Rhinoceros® software and exported to CAE Ansys®, where simulations were performed using FEA. Model validation was conducted by comparing the experimental S-N curve results with the simulated data through non-parametric statistical tests for correlation, agreement, and comparison. Infinite life for all three groups was reached at 188N, corresponding to 33% of the maximum load for Group 1, 27% for Group 2, and 25% for Group 3. When inputting data into the FEA software, the results showed a strong correlation between *in vitro* and *in silico* methods. Spearman’s test indicated significant correlation in all cases, while the Wilcoxon test showed $p > 0.5$, revealing no significant differences between the methods. The Bland-Altman test demonstrated 95% agreement between the two methods across all three groups. Thus, the hypothesis that there is no significant difference between *in vitro* and *in silico* results was validated. Additionally, FEA proved to be an efficient and cost-effective alternative for predicting the material’s “infinite life,” reducing the need for additional laboratory testing. The findings of this study reinforce the relevance of the S-N curve as a tool for analyzing the fatigue behavior of dental materials. The validation of the mathematical model expands clinical possibilities, enabling more precise adjustments in complex prosthetic structures while optimizing resources without compromising material reliability.

Keywords: fatigue; ceramics; mechanical properties; zirconia; computational models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Discos de IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic, Ivoclar Vivadent	25
Figura 2: Fresadora PrograMill PM7, Ivoclar Vivadent	26
Figura 3: Cilindro usinado dos discos de IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic, Ivoclar Vivadent.....	27
Figura 4: Fator de contração expresso nos discos de IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic, Ivoclar Vivadent pelo fabricante	27
Figura 5: Discos sinterizados – amostras preparadas	28
Figura 6: Cilindros utilizados para conferência do contato entre a ponta do pistão e os espécimes durante os testes mecânicos biaxiais	32
Figura 7: Modelo tridimensional elaborado no software CAD Rhinoceros®	35
Figura 8: Formação da malha na estrutura da amostra pelo software Ansys®	35
Figura 9: Distribuição de tensão e vida em fadiga da camada de zircônia 5Y-PSZ .	43
Figura 10: Distribuição de tensão e vida em fadiga da Faixa de Transição	44
Figura 11: Distribuição de tensão e vida em fadiga da camada de zircônia 4Y-TZP	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Histograma dos resíduos padronizados para os 3 grupos: dados <i>in vitro</i>	41
Gráfico 2: Histograma dos resíduos padronizados para os 3 grupos: dados <i>in silico</i>	47
Gráfico 3: Curvas S-N das três camadas de zircônia (5Y-PSZ, Faixa de Transição e 4Y-TZP): dados <i>in vitro</i>	49
Gráfico 4: Curvas S-N das três camadas de zircônia (5Y-PSZ, Faixa de Transição e 4Y-TZP): dados <i>in silico</i>	49
Gráfico 5: Comparação individual entre as curvas S-N <i>in vitro</i> e <i>in silico</i> : 5Y-PSZ ..	50
Gráfico 6: Comparação individual entre as curvas S-N <i>in vitro</i> e <i>in silico</i> : Faixa de Transição.....	51
Gráfico 7: Comparação individual entre as curvas S-N <i>in vitro</i> e <i>in silico</i> : 4Y-TZP...	51
Gráfico 8: Análise de concordância entre métodos <i>in vitro</i> e <i>in silico</i> da camada 5Y-PSZ	58
Gráfico 9: Análise de concordância entre métodos <i>in vitro</i> e <i>in silico</i> da Faixa de Transição.....	59
Gráfico 10: Análise de concordância entre métodos <i>in vitro</i> e <i>in silico</i> da camada 4Y-TZP.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Programa de sinterização IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic, Ivoclar Vivadent.....	28
Tabela 2: Propriedades mecânicas e físicas do material das diferentes camadas do disco de zircônia.....	34
Tabela 3: Resumo estatístico dos modelos de regressão linear por grupo amostral – dados <i>in vitro</i>	40
Tabela 4: Resumo estatístico dos modelos de regressão por grupo amostral: dados <i>in silico</i>	46
Tabela 5: Resultados dos testes de normalidade Shapiro-Wilk: dados <i>in vitro</i> e <i>in silico</i>	53
Tabela 6: Teste de correlação de Speaman para os dados da camada 5Y-PSZ.....	54
Tabela 7: Teste de correlação de Speaman para os dados da Faixa de Transição .	55
Tabela 8: Teste de correlação de Speaman para os dados da camada 4Y-TZP	55
Tabela 9: Comparação estatística dos dados <i>in vitro</i> e <i>in silico</i> pelo teste de Wilcoxon das tensões e dos números de ciclos das diferentes camadas do disco IPS e.max ZirCAD Prime.....	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Definição e caracterização da fadiga de materiais.....	15
2.2 Definição e características da curva S-N	16
2.2.1 Vida infinita.....	17
2.3 Zircônias de uso odontológico e suas combinações	17
2.4 Normas técnicas para ensaios de fadiga e elaboração da curva S-N	19
2.5 Modelagem matemática e simulação	19
2.6 Fadiga de materiais cerâmicos como a zircônia na odontologia	21
3 PROPOSIÇÃO	22
3.1 Objetivo geral	22
3.1.1 Objetivos específicos	22
3.2 Formulação de hipótese.....	22
4 MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1 Cálculo amostral	23
4.2 Confeção das amostras.....	24
4.2.1 Diferenças entre as amostras testadas <i>in vitro</i> e <i>in silico</i>	29
4.3 Teste de resistência à flexão biaxial	30
4.4 Teste de fadiga <i>Stress Life</i> (vida à tensão).....	31
4.5 Análise estatística para determinação da curva S-N	33
4.6 Comportamento da simulação da curva S-N (análise por elementos finitos)	33
5 RESULTADO.....	38
5.1 Elaboração da curva S-N <i>in vitro</i> e <i>in silico</i>	38
5.1.1 Processamento e transformação dos dados de fadiga.....	38
5.1.2 Análise estatística dos dados <i>in vitro</i> das três camadas do disco IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic para construção da curva S-N ..	39
5.1.3 Análise por elementos finitos e tratamento estatístico dos dados <i>in silico</i> das três camadas do disco IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic para construção da curva S-N	42

5.1.3.1 Análise por elementos finitos	42
5.1.3.2 Análise estatística dos dados <i>in silico</i>	46
5.1.4 Curva S-N plotada para os dados <i>in vitro</i> e <i>in silico</i>	48
5.2 Validação estatística do modelo matemático simulado na FEA para curva S-N com base nos dados <i>in vitro</i> das camadas do disco de IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic.....	52
5.2.1 Teste de normalidade: dados <i>in vitro</i> e <i>in silico</i>	52
5.2.2 Análise estatística com testes não paramétricos	53
5.2.2.1 Teste de correlação de Spearman	53
5.2.2.2 Teste de comparação de Wilcoxon	56
5.2.2.3 Teste de concordância entre os métodos <i>in vitro</i> e <i>in silico</i> pelo gráfico de Bland-Altman	57
6 DISCUSSÃO.....	61
7 CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICES	69

1 INTRODUÇÃO

A fadiga de materiais está associada ao surgimento de trincas na estrutura do material utilizado na fabricação de componentes complexos. Essas trincas, causadas pelo acúmulo de tensão na peça, propagam-se lentamente até o ponto de ruptura catastrófica (Burhan, Kim, 2018; Eljufout, Toutanji, Al-Qaralleh, 2019). A formação e crescimento dessas trincas, que geralmente são imperceptíveis no estágio inicial, são fundamentais para a compreensão do comportamento do material sob fadiga (Burhan, Kim, 2018).

Duas abordagens principais são utilizadas para investigar os danos causados pela fadiga. A primeira abordagem analisa trincas individuais, focando em seu comportamento por meio de parâmetros mecânicos, como o fator de intensidade de tensão e a taxa de crescimento da trinca, permitindo avaliar sua propagação até a falha. A segunda abordagem examina a propagação de múltiplas pequenas trincas, considerando sua formação, a interação e coalescência ao longo do tempo, bem como o impacto das características microestruturais, que afetam a capacidade do material em suportar uma quantidade de ciclos mais alta. Para esta abordagem, a construção da curva S-N é o método amplamente utilizado para caracterizar o comportamento de fadiga do material, fornecendo uma correlação entre a tensão aplicada e o número de ciclos até a falha (Burhan, Kim, 2018; Felix, Carrazedo, Possan, 2022).

O uso da curva S-N é essencial no planejamento de estruturas e particularmente relevante para a odontologia, pois conhecer as características de fadiga dos materiais odontológicos, como as cerâmicas, garante previsibilidade ao material quando submetido a forças cíclicas inerentes ao processo de mastigação (Kelly et al., 2017). Essa ferramenta permite identificar o limite de resistência à fadiga, ou seja, o nível de tensão abaixo do qual um material pode, teoricamente, suportar um número infinito de ciclos sem falhar, conceito esse conhecido como "vida infinita" (Goedel, Mezzomo, Pravia, 2018; Garcia-González et al., 2020). A obtenção de uma curva S-N precisa exige um grande número de amostras e ensaios controlados, com a aplicação de diferentes níveis de tensão, até atingir o colapso do material (Strzelecki, Sempruch, 2016).

Nas últimas décadas, a zircônia tetragonal estabilizada por ítria tornou-se um material amplamente utilizado na odontologia devido à sua resistência e estética. A terceira geração desse material, a 4Y-TZP e a 5Y-PSZ, apresentam maior translucidez, em contrapartida, sua resistência à fratura foi reduzida em comparação às gerações anteriores de zircônia, implicando novos desafios em avaliar o comportamento em fadiga desses materiais (Finck et al., 2020; Schönhoff et al., 2021). Com esse desenvolvimento, surgem no mercado os discos de fresagem multicamadas, como o disco IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic, que combina em camadas as zircônias 4Y-TZP e 5Y-PSZ, com o objetivo de oferecer melhor estética e resistência às próteses (Ivoclar Vivadent, 2023).

Diante desse cenário, o presente estudo visa determinar a curva S-N das diferentes camadas de zircônias, 5Y-PSZ, Faixa de Transição e 4Y-TZP do disco IPS e.max ZirCAD Prime Esthetic, cedido para a pesquisa pela empresa desenvolvedora do produto, Ivoclar Vivadent. Além disso, busca-se validar um modelo matemático, baseado na análise por elementos finitos e técnicas estatísticas, que possibilite o aprimoramento do design de próteses dentárias. Isso inclui a criação de estruturas mais complexas, otimizadas para suportar cargas funcionais variadas e compatíveis com o comportamento mecânico real dos materiais, ou seja, estruturas capazes de alcançar a “vida infinita” do material quando postas em função. Dessa forma, o planejamento digital torna-se mais confiável, permitindo uma melhor previsão da longevidade e do desempenho das próteses na prática clínica. A hipótese é que não há diferença entre a vida infinita dos materiais demonstrada pelas curvas S-N e o modelo matemático apresentado pela análise por elementos finitos.

7 CONCLUSÃO

Dentro das limitações deste estudo, pode-se concluir que:

- a) os objetivos propostos foram atingidos, validando a hipótese de nulidade ao demonstrar que não há diferença estatisticamente significativa, entre a curva S-N obtida *in vitro* e *in silico*.
- b) As camadas 4Y-TZP e 5Y-PSZ apresentaram, respectivamente, maior e menor resistência mecânica, enquanto a Faixa de Transição exibiu um desempenho intermediário, corroborando a relação esperada entre composição microestrutural e resistência mecânica.
- c) A modelagem matemática utilizando FEA demonstrou alto grau de correlação, concordância e ausência de diferenças significativas em relação aos resultados experimentais, comprovando seu potencial para substituir com segurança a etapa experimental da elaboração da curva S-N. Essa substituição pode otimizar o tempo, recursos e materiais, além de viabilizar simulações confiáveis do comportamento em fadiga.

REFERÊNCIAS

Almeida, CC. et al. Zircônia ultra translúcida: Revisão de literatura. J Dent Public Health. ISSN: 2596-3368. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17267/2596-3368dentistry.v11v2.3306>

Alshoaibi, AM; Fageehi, YA. Numerical Analysis on Fatigue Crack Growth at Negative and Positive Stress Ratios. Materials. 2023. Acessado em: 22/08/2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16103669>.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 6872: Odontologia – Materiais cerâmicos. Rio de Janeiro: ABNT. 2016.

ASTM. American Society for Testing and Materials. E 739 – 91 Standart Practice for Statistical Analysis of Linear or Lienarized Stress Life (S- N) and Strain Life (- N). 1998. Disponível em: <https://www.astm.org/e0739-91r04.html>.

ASTM. American Society for Testing and Materials. E 468 – 90 Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials. 1998. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/12948/3dd58a7db61049b292bca8c115164f68/ASTM-E468-90-1998-.pdf>.

Belli R. et al. Chairside CAD/CAM materials. Part 1: Measurement of elastic constants and microstructural characterization. Dental Materials. Volume 33, Issue 1. 2017. Disponível em: <https://sciencedirect.com/science/article/pii/S0109564116305681?via%3Dihub>.

Bohm M. et al. Application of the S-N Curve Mean Stress Correction Model in Terms of Fatigue Life Estimation for Random Torsional Loading for Selected Aluminum Alloys. Materials 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13132985>.

Burhan I, Kim HO. S-N Curve Models for Composite Materials Characterisation: An Evaluative Review. Journal of Composites Science. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-477X/2/3/38>.

Eljufout T, Toutanji H, Al-Qaralleh M. Fatigue Stress-Life Model of RC Beams Based on an Accelerated Fatigue Method. Infrastructures. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2412-3811/4/2/16>.

Faria, FF. et al. Análise de elementos finitos de um dispositivo de dinamização controlada para fixação circular externa. Rev Bras Ortop 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1055/s-0040-1721368>.

Felix EF, Carrazedo R, Possan E. Análise experimental da vida útil à fadiga de concretos submetidos à compressão cíclica de baixa frequência. revista Matéria, v.27, n.1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2021-45017>.

Finck NS. et al. Propriedades e indicações clínicas das zircônias translúcidas: revisão narrativa. Revista Eletrônica Acervo Saúde. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.25248/reas.e4637.2020>.

Fukushima, KA. et al. Omparison of subcritical growth parameters of a Y-TZP obtained via cyclic or dynamic fatigue tests. Dental Materials. Volume 40. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.02.005>.

Garcia-González M. et al. Optimized Planning and Evaluation of Dental Implant Fatigue Testing: A Specific Software Application. Biology (Basel). 2020. Disponível em: [10.3390/biology9110372](https://doi.org/10.3390/biology9110372).

Goedel F, Mezzomo GP, Pravia ZMC. Fatigue lifespan of a fillet welded joint – Hybrid approach to obtain the S-N curve with a reduced number of tests. Latin American Journal of Solids and Structures. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1679-78255194>.

Ivoclar Vivadent. IPS e.max® ZirCAD Prime & Prime Esthetic. 2023. Disponível em: https://www.ivoclar.com/pt_br/products/digital-processes/ips-e.max-zircad-prime-family.

Kaizer, MR. et al. Probing the interfacial strength of novel multi-layer zirconias. Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.10.008>.

Kelly JR. et al. ADM guidance-ceramics: Fatigue principles and testing. Dent Mater. 2017. Disponível em: https://unitau.br/files/arquivos/category_151/Artigo_2_1544622637.pdf.

Lai, F. et al. Rotating Bending Fatigue Behaviors of C17200 Beryllium Copper Alloy at High Temperatures. Materials. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma16020815>.

Lee, YL. et al. Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice). Elsevier Butterworth-Heinemann. 2005.

Lotti, RS. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. Rev. Dent. Press Ortodon. Ortop. Facial 11 (2) • Abr 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-54192006000200006>.

Middleton, J; Jones, ML; Wilson NA. Three-dimensional analysis of orthodontic tooth movement. J Biomed Eng, Surrey, v. 12, no. 4, p. 319-327, Jul. 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0141-5425\(90\)90007-A](https://doi.org/10.1016/0141-5425(90)90007-A).

Miot HA. Análise de concordância em estudos clínicos e experimentais. Editorial • J. vasc. bras. 15 (2) • Apr-Jun 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1677-5449.004216>.

Miot HA. Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e experimentais. EDITORIAL • J. Vasc. Bras. 16 (2) • Apr-Jun 2017. <https://doi.org/10.1590/1677-5449.041117>.

Musa, DB, Ereifej, NS. The influence of core-build up materials on biaxial flexural strength of monolithic strength-gradient zirconia; an in-vitro study. BMC oral health. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03635-2>.

Pereira RM. et al. A comparative study of mechanical properties of yttria stabilized zirconia monolithic and bilayer configuration for dental application. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. Volume 148. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106160>.

Schönhoff, LM. et al. Fatigue resistance of monolithic strength-gradient zirconia materials. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials Volume 119. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.10450>.

Strzelecki P, Sempruch J. Experimental method for plotting s-n curve with a small number of specimens. POLISH MARITIME RESEARCH 4 (92) 2016. Disponível em: <https://intapi.sciendo.com/pdf/10.1515/pomr-2016-0079>.

Viali L. Testes de Hipóteses Não Paramétricos. Porto Alegre: Instituto de Matemática – Departamento de Estatística, UFRGS; 2008. Disponível em: http://www.mat.ufrgs.br/~viali/estatistica/mat2282/material/apostilas/Testes_Nao_Parametricos.pdf

Wendler, M. et al. Chairside CAD/CAM materials. Part 3: Cyclic fatigue parameters and lifetime predictions. Dental Materials. 2028. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.03.024>.

Zhang, Y; Sailer, I; Lawn, BR. Fatigue of dental ceramics. J Dent. 2013. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3877306/pdf/nihms541056.pdf>.