



Análisis de Weibull Para la Predicción de Fallas en Restauraciones con Cerámicos para Premolares Humanos*

Weibull Analysis of Failures in Ceramic Restorations of Human Premolars

Previsão de Weibull de falha em restaurações cerâmicas de pré-molares humanos

Claudia Patricia Chaustre-Sánchez^a, Ismael Humberto García-Páez^b, Jhon Erickson Barbosa-Jaimes.^{c*}

^aM.Sc. en Ciencia y Tecnología de Materiales 

^bPh.D. en Ciencias Químicas 

^cM.Sc. en Ingeniería Mecánica 

^{abc}Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.

Forma de citar: Chaustre, C., García, I., Barbosa, J. (2016). Análisis de Weibull Para la Predicción de Fallas en Restauraciones con Cerámicos para Premolares Humanos. Encuentro Internacional en Educación Matemática Segunda Versión ISSN 2539-1885. La Educación Matemática como Herramienta en el Desempeño Profesional. Cúcuta, Colombia 38 - 42.

Resumen: El comportamiento mecánico de los materiales cerámicos es menos predecible que el de los metales debido a la alta dispersión de los resultados en los diferentes ensayos mecánicos. Desde este punto de vista, el estudio de la resistencia de los materiales cerámicos debe considerar criterios de falla probabilísticos y no determinísticos, y deben estar basados en el comportamiento de las variables de estudio desarrolladas en la experimentación. La distribución de Weibull permite el análisis de fiabilidad para modelar los tiempos para falla o la probabilidad de falla a una determinada carga mecánica. Esta investigación se basa en la aplicación de la distribución de Weibull para hacer el análisis estadístico de los datos de la resistencia a la fractura de coronas de premolares restaurados con disilicato de litio mediante la técnica de cera perdida y de óxido de zirconio mediante la metodología CAD-CAM. Se fabricaron 10 muestras de premolares idénticas de cada material para su estudio. Los resultados obtenidos para el óxido de zirconio ($F_0 = 2063,6$ N y $m = 2,28$) y para el disilicato de litio ($F_0 = 1453,4$ N y $m = 2,85$), indican que aunque las restauraciones realizadas en óxido de zirconio presentan mejores resultados de resistencia, las restauraciones fabricadas en disilicato de litio presentan mayor fiabilidad. Queda a criterio del odontólogo definir la característica que considere de mayor importancia en su toma de decisiones acerca del uso del material adecuado.

Palabras clave Coronas premolares, disilicato de litio, distribución de weibull, óxido de zirconio, resistencia a la fractura.

Abstract: The mechanical behavior of ceramic is less predictable than that of metals, due to the high variety of results in different mechanical tests. It is in this context that the study of ceramic materials' resistance should consider probabilistic and non deterministic failure criteria, as well as be based on the behavior of the study variables developed in the experimentation. The Weibull distribution enables reliability analysis to model the time to failure or the probability of failure of a given mechanical load. This research is based on the application of the Weibull distribution to make a statistical analysis of the fracture resistance data of premolar crowns restored with either lithium disilicate, using the lost-wax or zirconium oxide technique, or CAD-CAM methodology. Ten identical premolar samples of each material were manufactured for this investigation. The results obtained for zirconium oxide ($F_0 = 2063.6$ N and $m = 2.28$) and for lithium disilicate ($F_0 = 1453.4$ N and $m = 2.85$) indicate that although restorations using zirconium oxide produce better endurance results, restorations manufactured with lithium disilicate are generally more reliable. It is at the individual dentist's discretion to decide the characteristic that he considers of greater importance in his decision-making about the which material is more suitable.

Keywords Premolar crowns, lithium disilicate, weibull distribution, zirconium oxide, fracture resistance.

* Autor para correspondencia claudiapatriciacs@ufps.edu.co

2590-9215© 2017 Universidad Francisco de Paula Santander. Este es un artículo bajo la licencia CCBY

Abstract: O comportamento mecânico dos materiais cerâmicos é menos previsível do que o dos metais, devido à alta dispersão dos resultados nos diferentes testes mecânicos. Desse ponto de vista, o estudo da resistência de materiais cerâmicos deve considerar critérios de falha probabilísticos e não-determinísticos, e deve ser baseado no comportamento das variáveis de estudo desenvolvidas na experimentação. A distribuição de Weibull permite a análise de confiabilidade para modelar o tempo a falha ou a probabilidade de falha de uma determinada carga mecânica. Esta pesquisa baseia-se na aplicação da distribuição de Weibull para fazer a análise estatística dos dados de resistência à fratura de coroas de pré-molares restaurados com dissilicato de lítio usando a técnica de cera perdida e óxido de zircônio a metodologia CAD-CAM. Ten amostras de pré-molares idênticos de cada material foram fabricados Os resultados obtidos para óxido de zircônio ($\sigma = 2063,6$ N e $m = 2,28$) e para dissilicato de lítio ($F_0 = 1453,4$ N e $m = 2,85$) indicam que. Embora as restaurações feitas em óxido de zircônio tenham melhores resultados de resistência, as restaurações fabricadas em dissilicato de lítio são mais confiáveis. É a critério do dentista definir a característica que ele considera de maior importância em sua tomada de decisão sobre o uso de material adequado.

Palavras chave Atividades de pesquisa exploratória, tarefas investigativas exploratórias, pesquisa matemática.

Introducción

El odontólogo se encuentra diariamente con el dilema de la elección de diferentes alternativas frente al comportamiento de los dientes restaurados ante las fuerzas ejercidas por la masticación. Este trabajo de investigación contempla dar mayor información del comportamiento de coronas premolares sometidas a cargas o fuerzas externas, de manera que apoye a este profesional en la selección de un buen tratamiento restaurativo.

La restauración metálica de dientes premolares se ha utilizado por más de 40 años. Sin embargo, este material puede comprometer la salud buco-dental del paciente además requiere de gran grosor de cerámica de estratificación para enmascarar el metal (Guzmán, 2007). Debido a estas razones, en la actualidad se han implementado diversos materiales cerámicos puros, que aseguran mejorar la resistencia, la estética y la biocompatibilidad de las restauraciones.

Un factor importante al restaurar los dientes es la resistencia del material restaurador. Esta propiedad mecánica del material permite que la restauración funcione de manera eficaz y durante el mayor tiempo posible. Los materiales cerámicos tienen un comportamiento frágil, por lo que presentan una gran dispersión en los resultados de los ensayos mecánicos.

Esta variación se debe a la presencia de imperfecciones, propias de los materiales cerámicos, por lo que para el estudio de resistencia a la fractura se prefiere usar criterios de fallo probabilísticos (Ramos, 2015). Por esta razón, para los dos materiales del presente estudio exclusivamente cerámicos, es mejor analizar la probabilidad de falla que la resistencia del material. La presente investigación determina el efecto de la preparación y del material en la probabilidad de falla por fractura de coronas premolares humana sin vitro restauradas con dos preparaciones distintas, mediante un análisis estadístico de Weibull.

Metodología Experimental

Materiales. Se fabricaron 10 coronas premolares de disilicato de litio por el método de la cera perdida y 10 de óxido de zirconio por la metodología de diseño asistido por computador manufactura asistida por computador (Computer - Aided Design - Computer - Aided Manufacturing (CAD-CAM)). Las restauraciones se obtuvieron a partir del mismo modelo para evitar diferencias en la forma, que pudieran afectar la interpretación de resultados.

Métodos.

Metodología de la cera perdida. Este método se usó para la elaboración de las coronas en disilicato de litio, se emplearon las condiciones recomendadas por los fabricantes. El proceso de fabricación de las coronas premolares inicia con la elaboración de un modelo en yeso que se produce llevando a la boca un material blando denominado alginato, que es utilizado en odontología para obtener impresiones dentales en una cubeta de acuerdo a la medida del paciente esperando que este endurezca registrando todas las piezas dentales de la boca, luego se coloca sobre el molde, yeso extraduro tipo 4 que reproduce detalles y dimensiones fielmente, siendo separada la impresión del modelo luego de 60 minutos que dura el fraguado.

A continuación, se modela en cera la estructura con la técnica de goteo, la cual se une a una base cilíndrica por medio de un jito o bebedero. El montaje de modelo, jito y base, se coloca dentro de un cilindro de silicona, el cual se llena de manera lenta con una mezcla llamada de revestimiento de manera que lo cubra completamente y que al fraguar hará las veces de molde.

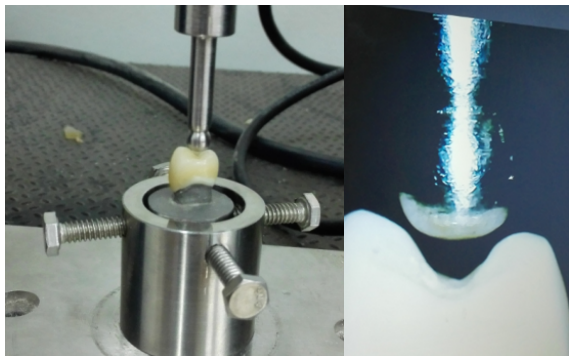
Una vez transcurrido el tiempo de fraguado se coloca el cilindro en el horno para desencerado hasta una temperatura de 854°C por 50 minutos. Posteriormente se inyecta el material cerámico en el molde y se lleva a una temperatura de 930 °C por 30 minutos.

Finalmente, el producto se maquilla con un material cerámico de estratificación y se sinteriza durante 10 minutos aproximadamente hasta una temperatura de 765 °C para obtener la restauración total.

Metodología CAD-CAM.

Se sinteriza durante 12 horas: dura 5 horas para alcanzar la temperatura máxima de 1350°C y luego 6 horas de enfriamiento dentro del horno ivoclar vivadent hasta que éste hace sonar la alarma cuando alcanza la temperatura ambiente. De la misma forma que en las restauraciones de disilicato de litio se aplican en capas muy delgadas por partes iguales las cerámicas de estratificación de alta estética que dan en la restauración el color básico del diente, la opacidad y fluorescencia del diente natural y se realiza una cocción a 765 °C por 10 minutos.

Prueba de Resistencia a la Fractura. La prueba se realizó en una máquina universal de ensayos mecánicos modelo EMIC DL2000 con una celda de 5 kN, a una velocidad regulada de 0.5mm/min hasta rotura de la muestra. Como se presenta en la Gráfica 1, la carga fue aplicada mediante una esfera de acero inoxidable de 6mm de diámetro unida a un vástago de acero en el área oclusal de los dientes.



Gráfica 1. Montaje para el ensayo de resistencia a la fractura
Fuente: Autores

Los datos obtenidos corresponden a la carga de falla, F , puesto que no se puede calcular un esfuerzo, debido a que el área que soporta la carga no puede ser definida con claridad, por ser ésta una prueba simulativa con probetas de forma irregular que hacen que las fuerzas cambien de dirección a medida que avanza el ensayo. Por tanto, en el presente documento se cambiará el símbolo de esfuerzo sigma, por la letra, F , que representa la fuerza de falla.

Análisis Estadístico

El análisis estadístico se realizó mediante la norma europea UNE843 - 5 parte 5 (2006 (Española, N. UNE -EN843 - 5,2006), para propiedades mecánicas de cerámicas técnicas avanzadas en términos de una distribución de Weibull de dos parámetros mediante técnicas de estimación de la probabilidad máxima.

La norma recomienda que la muestra no debería ser inferior a 30 especímenes, sin embargo, menciona que por razones de costo pueden usarse cantidades menores. En investigaciones similares se han propuesto estudios con 10 muestras (Guerra, 2012).

Procedimiento de cálculo La función de distribución de probabilidad responde a la siguiente ecuación:

$$F(x, m, \beta) = 1 - \exp^{-(\frac{x}{\beta})^m} \quad (1)$$

Donde m es el módulo de Weibull o de parámetro de forma (>0) y β es el parámetro escala (>0).

Las fuerzas obtenidas en cada ensayo se ordenan comenzando desde el menor valor hasta el mayor y se asigna un número correlativo “ i ” a cada valor de carga. A partir del número correlativo “ i ” se asigna una probabilidad de fractura a cada muestra: La probabilidad de fractura (P_{fi}), se calcula así:

$$P_{fi} = \frac{i-0,5}{N} \quad (2)$$

Donde N es el número total de datos de carga de fractura de las coronas. Con los resultados de la Tabla I, se procede a determinar los parámetros de Weibull.

Determinación de los parámetros de Weibull Se representa el gráfico de los datos con la abscisa $x_i = \ln(F_{fi})$ y la ordenada: $y_i = \ln[\ln(1/(1 - p_{fi}))]$ y se evidencia la linealidad. Si no es clara la linealidad puede que los datos no se ajusten al modelo de Weibull de dos parámetros. La norma permite que los puntos en los extremos alto y bajo de la probabilidad tengan un pequeño desplazamiento.

No. correlativo, i	Fuerza de falla, Carga F_{fi} (N)	
	Disilicato de litio	óxido de zirconio
1	527	833
2	869	910
3	934	1067
4	1178	1240
5	1231	1722
6	1295	1822
7	1410	2234
8	1534	2501
9	1764	2748
10	2097	3051

Fuente Autores

Si se evidencia la linealidad, se procede a determinar el parámetro m de Weibull, mediante el método de probabilidad máxima. El cálculo se realizó en el programa “Free Statics and Forecasting Software” disponible en línea en internet (Wessa, 2016).

Corrección del sesgo El m obtenido por este método tiene un sesgo que proporciona un valor sobreestimado del módulo de Weibull real.

Para corregirlo se hace necesario utilizar un factor no-sesgado $b=0.859$, usando la tabla del anexo D de la norma y que depende del número de muestras N.

$$m_{corr} = m * b \quad (3)$$

Determinación de los límites del intervalo de confianza

Este estudio se consideró un nivel de confianza del 95% Con este valor y $N=10$, se determina el factor del límite superior e inferior del nivel de confianza, t_u y t_l , en la tabla del anexo E de la norma. ($t_u = -0,876$ y $t_l = 0,644$.)

Los valores superior e inferior de F_0 correspondientes a los límites superior e inferior del intervalo de confianza, C_u y C_l , se determinan así:

$$C_u = F_0 \exp\left(\frac{-t_u}{m}\right) \quad \text{y} \quad C_l = F_0 \exp\left(\frac{-t_l}{m}\right) \quad (4)$$

Determinación de los límites del intervalo de confianza para m

El valor de confianza debe ser el mismo que el usado para el valor de F_0 . Con este dato y el número de muestras, N, se determina el factor del límite superior e inferior del nivel de confianza, l_u y l_l , en la tabla del anexo F de la norma ($l_u=0,676$ y $l_l=1,602$). Los límites de los intervalos de confianza superior e inferior para m, D_u y D_l , se determinan así:

Donde m nuevamente es el valor sesgado.

Gráfica de las curvas de probabilidad Probabilidad de Falla P_f vs F_f los datos reales se grafican mediante $P_{fi} = (i-0,5) / N$ y los datos calculados con el modelo:

$$P_{fi} = 1 - e^{-(F_f/F_0)^{m_{corr}}} \quad (5)$$

Donde F_0 , para este caso específico es el factor de escala y se denomina carga característica.

Resultados y Discusión

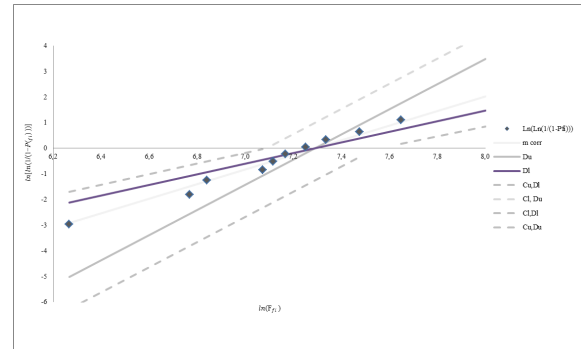
En la Tabla 2, se presenta un resumen de los resultados del análisis estadístico, y en las Gráficas 2 y 3 las curvas para un intervalo de confianza del 95% para cada uno de los dos materiales. En la Gráfica 4 se muestran las curvas de probabilidad de Weibull.

Donde m nuevamente es el valor sesgado.

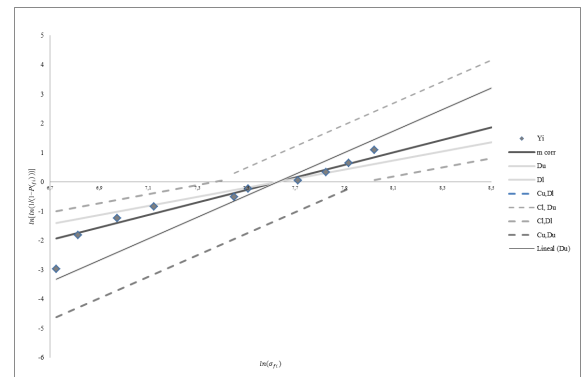
Tabla 2 Parámetros de Weibull

Material	Disilicato de litio	Óxido de zirconio
<i>m</i>	3,319	2,656
<i>m_{corr}</i>	2,851	2,282
<i>C_u, N</i>	1891,9	2869,8
<i>C_l, N</i>	1196,7	1619,3
<i>D_u</i>	4,910	3,929
<i>D_l</i>	2,072	1,658
<i>F₀, N</i>	1453,0	2063,6

Fuente: Autores



Gráfica 2. Curvas correspondientes a un intervalo de confianza del 95%, para el disilicato de litio. Fuente: Autores



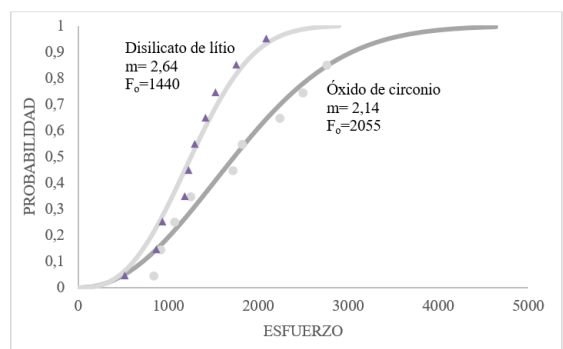
Gráfica 3. Curvas correspondientes a un intervalo de confianza del 95%, para el óxido de zirconio. Fuente: Autores

De las Gráficas 2 y 3 se puede concluir que existe linealidad de los datos en los dos casos y por tanto se pueden considerar que tienen comportamiento de distribución de Weibull de dos parámetros y los resultados son válidos dentro del nivel de confianza del 95%.

Los resultados, de la Tabla 2 y de la Gráfica 4 indican que las coronas fabricadas en óxido de circonio por el método de cera perdida presentan mayor resistencia (mayor F_0), y que las coronas fabricadas en disilicato de litio por el método CAD-CAM tienen más fiabilidad (mayor m). Debido a la ausencia de referencias con pruebas idénticas, no se puede hacer una comparación de los valores de las fuerzas de rotura puesto que estos dependen de la prueba y de la forma y el tamaño de la muestra.

Sólo se puede hacer alguna comparación del análisis de la fiabilidad si se comparan los valores de m con los obtenidos en otro tipo de pruebas, así, los valores de m obtenidos en este estudio se consideran bajos si se comparan con los valores entre 5,5 y 10 publicados para materiales similares y tratados de forma similar pero utilizando otro tipo de pruebas mecánicas. (Bogna y otros, 2012, Cortellini y otros, 2014 y Duan y Giggs 2011).

En la Gráfica 4, se presentan las curvas de probabilidad de falla para los dos materiales, los puntos corresponden a los datos experimentales y la curva al modelo de Weibull obtenido.



Gráfica 4. Curvas de Probabilidad de Weibull de los materiales estudiados
Fuente: Autores

Conclusiones y Recomendaciones

El análisis de Weibull es una herramienta útil para el estudio de las propiedades mecánicas de las restauraciones dentales y aportan información importante para la decisión del material a utilizar. Las curvas de confianza demuestran que los datos de resistencia de los materiales tienen comportamiento de distribución de Weibull y por tanto los resultados son válidos dentro de este nivel de confianza.

Los resultados obtenidos fueron para el óxido de circonio ($F_0 = 1453,0$ N y $m = 3,319$) y para el disilicato de litio ($F_0=2063,6$ N y $m=2,656$). El odontólogo definirá a su criterio la característica que considere de mayor importancia en la decisión del material a utilizar.

Referencias

- Cortellini D, Canale A, Souza R, Campos F, Lima JC, Özcan M. (2014) Durability and Weibull characteristics of lithium disilicate Crowns Bonded on Abutments with Knife-Edge and Large Chamfer Finish Lines after Cyclic Loading. *Journal of Prosthodontics* 24, 615–619.
- Duan, Y, Griggs J.A. (2011) Weibull analysis of dental zirconia ceramic with different finishing procedures. *Dental materials*, 27Se1–e84.

Guerra, J. (2012). Estudio comparativo in vitro sobre la adaptación marginal en coronas de disilicato de litio: prensadas vs CAD/CAM (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León). *Rehabilitación oral*, 21-35. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/2909/1/1080256505.pdf>.

Guzmán, H. (2007). *Biomateriales odontológicos de uso clínico*. Bogotá, Colombia: Litocamargo Ltda.

Norma Española, N. UNE-EN 843-5. (01 de 01 de 2006). *Cerámicas técnicas avanzadas. Cerámicas monolíticas. Propiedades mecánicas a temperatura ambiente. Parte 5: Análisis estadístico*.

Ramos A, Muniz-Calvente M, Fernández P, Fernández A y Lamela M J. (2015). Análisis probabilístico de elementos de vidrio recocido mediante una distribución triparamétrica Weibull. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 153-158.

Wessa, P. (2016). *Free Statistics Software, Office for Research Development and Education, version 1.1.23-r7*. Obtenido de *Free Statistics and Forecasting Software*: <http://www.wessa.net/>.