

Análisis de las Propiedades Mecánicas en Materiales Odontológicos para restauraciones a través de Ensayos de Compresión

César A. Paltán¹, Jorge I. Fajardo¹, Cristian Abad-Coronel², Rafael Cumbajin-Ortega¹

¹Grupo de investigación en nuevos materiales y procesos de transformación, Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Email: cpaltan@ups.edu.ec

²Grupo de investigación en materiales CAD/CAM y odontología digital, Facultad de Odontología, Universidad de Cuenca, Ecuador. Email: cristian.abad@ucuenca.edu.ec

Resumen

Se realiza un análisis de las propiedades mecánicas de varios biomateriales empleados en la elaboración de restauraciones dentales, 4 materiales para restauraciones temporales que son: polimetilmetacrilato (PMMA), PMMA modificado con grafeno (GRA), resina de acetilica (AR), polisulfona (PS) y los 2 materiales para restauraciones definitivas que son de dióxido de circonio, el primer grupo fue Zolid Gen X Amann Girrbach (ZGX) y el segundo grupo fue Cercon HT Dentsply Sirona (CDS), se prepararon muestras de coronas dentales de tres unidades para las restauraciones temporales y de una sola unidad para las restauraciones definitivas, todos ellos obtenidos mediante un proceso de fresado asistido por computadora (CAD/CAM). Además de analizar los valores máximos de ruptura, se llevaron a cabo análisis analíticos para determinar otros parámetros como el módulo de elasticidad. Los resultados obtenidos revelaron diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes materiales. El PMMA mostró un valor significativamente menor en comparación con los otros materiales, mientras que el PS exhibió el valor más alto. GRA y RA presentaron valores dentro de un rango similar, aunque superiores al PMMA. Estos hallazgos indican que los biomateriales GRA, RA y PS pueden considerarse opciones viables para restauraciones provisionales fresadas, ofreciendo alternativas más allá del PMMA. Las coronas circonio ZGX mostraron suficiente resistencia a la fractura cuando se usaron en las zonas de los molares y premolares, soportaron cargas de fractura mayores que la fuerza masticatoria máxima.

Palabras clave: Resistencia a la fractura; Materiales CAD/CAM, restauraciones provisionales y definitivas, Propiedades mecánicas.

Abstract

An analysis of the mechanical properties of several biomaterials used in the preparation of dental restorations is carried out, 4 materials for temporary restorations that are: polymethyl methacrylate (PMMA), PMMA modified with graphene (GRA), acetyl resin (AR), polysulfone (PS) and the 2 materials for definitive restorations that are made of zirconium dioxide, the first group was Zolid Gen units for temporary restorations and a single unit for definitive restorations, all obtained through a computer-assisted milling process (CAD/CAM). In addition to analyzing the maximum rupture values, analytical analyzes were carried out to determine other parameters such as the elastic modulus. The results obtained revealed statistically significant differences between the different materials. PMMA showed a significantly lower value compared to the other materials, while PS exhibited the highest value. GRA and RA presented values within a similar range, although higher than PMMA. These findings indicate that GRA, RA, and PS biomaterials can be considered viable options for milled provisional restorations, offering alternatives beyond PMMA. ZGX zirconia crowns showed sufficient fracture resistance when used in the molar and premolar areas, withstanding fracture loads greater than the maximum chewing force.

Keywords: Fracture resistance; CAD/CAM materials, provisional and definitive restorations, Mechanical properties.

1. Introducción

La evolución en el campo de la odontología ha estado estrechamente vinculada con el desarrollo y la innovación en materiales dentales [1]. En los últimos años existe un incremento significativo en el desarrollo de tecnología aplicada en la salud dental, los materiales de restauración se utilizan para tratar clínicamente y reconstruir dientes dañados, así como para recuperar sus funciones [2–5]. La amalgama y la resina dental se utilizan comúnmente como materiales de obturación de cavidades para el esmalte y la dentina dañados por la caries dental [6,7]. La resina dental, la cerámica dental y el circonio se utilizan para la fabricación estética de dientes de resina para dentaduras postizas, los implantes dentales de aleación de titanio se utilizan cuando se pierde todo el diente; la aleación de titanio también se utiliza para producir pilares para implantes, estructuras para prótesis dentales y fijaciones para implantes [7–12]. Esto ha llevado a un intenso uso de materiales biocompatibles en diferentes procedimientos generando el interés en entender y conocer las propiedades mecánicas de estos biomateriales en aplicaciones dentales, donde la resistencia a la compresión juega un papel crucial en la eficacia y durabilidad de los tratamientos [8]. La búsqueda de materiales que ofrezcan una mayor resistencia mecánica, biocompatibilidad y estética ha impulsado numerosos estudios y avances tecnológicos. En este contexto, los materiales CAD/CAM han ganado protagonismo debido a su precisión y capacidad para producir restauraciones dentales personalizadas de alta calidad [9,10].

Los estudios han comparado varios materiales de restauración, incluidos composites, cerámicas e ionómeros de vidrio, evaluando su resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, dureza y módulo elástico [1,11,12]. Los nanocompuestos generalmente exhiben propiedades mecánicas superiores en comparación con los materiales convencionales [12]. Los investigadores también han explorado materiales novedosos, como rellenos de sílice mesoporosos y compuestos de vidrio bioactivos, para mejorar el rendimiento mecánico y la bioactividad [13,14]. Las propiedades mecánicas de los dientes humanos, particularmente el esmalte y la dentina, sirven como puntos de referencia para el desarrollo de materiales de restauración [15]. Si bien las pruebas estandarizadas son cruciales para evaluar las propiedades mecánicas, su relación con el desempeño clínico sigue sin estar clara, lo que requiere el desarrollo de protocolos de prueba cuasi-clínicos [16]. Comprender estas propiedades es esencial para seleccionar materiales apropiados para aplicaciones clínicas [17].

Los materiales empleados en las restauraciones dentales se pueden categorizar en provisionales y

definitivos, cada uno con requerimientos específicos en términos de propiedades mecánicas y durabilidad [18–20]. En el ámbito de las restauraciones temporales, los polímeros como el polimetilmetacrilato (PMMA), PMMA modificado con grafeno (GRA), resina de acetilo (AR) y polisulfona (PS) han sido ampliamente estudiados. Estos materiales deben proporcionar suficiente resistencia y estabilidad para proteger la preparación dental subyacente mientras se espera la colocación de la restauración definitiva [21,22].

Por otro lado, las restauraciones definitivas requieren materiales que no solo soporten las fuerzas masticatorias a largo plazo, sino que también mantengan su integridad estructural y estética [23]. El dióxido de circonio, representado en estudios por materiales como Zolid Gen X Amann Girrbach (ZGX) y Cercon HT Dentsply Sirona (CDS), ha demostrado ser una opción robusta y duradera para coronas y puentes definitivos debido a su alta resistencia a la fractura y excelente biocompatibilidad [24–26].

Durante la masticación, las fuerzas de mordida se aplican en la zona oclusal del diente. Estas fuerzas de mordida comprenden una fuerza de compresión vertical y una fuerza de compresión del lado lingual [27,28]. La resistencia a la compresión es uno de los principales esfuerzos a los que están sometidos las restauraciones dentales, y la capacidad de un material para resistir estos esfuerzos es crucial para su rendimiento clínico. En este contexto, la evaluación de la resistencia a la compresión de diversos biomateriales ofrece una comprensión más profunda de su idoneidad para aplicaciones dentales [29–31].

Este artículo se enfoca en revisar y analizar las propiedades mecánicas, específicamente la resistencia a la compresión, de varios materiales utilizados en odontología tanto para restauraciones provisionales como definitivas. A través de una serie de ensayos y análisis comparativos, se proporciona una visión integral de cómo estos materiales se desempeñan bajo condiciones de carga, facilitando así la selección informada de materiales en la práctica clínica odontológica.

2. Materiales y Métodos

2.1. Biomateriales evaluados

Se evaluaron seis tipos de biomateriales, de los cuales cuatro son utilizados para restauraciones temporales. Polimetilmetacrilato (PMMA), PMMA modificado con grafeno (GRA), Resina acetífica (RA), y Polisulfona (PS) [21], y para restauraciones definitivas se utilizaron dos tipos de dióxido de circonio, Zolid Gen X Amann Girrbach (ZGX) y Cercon HT Dentsply Sirona (CDS) que fueron sinterizados en un horno por

8h a una temperatura máxima de 1500 °C [23]. La geometría analizada tiene forma de coronas dentales de tres unidades para las restauraciones temporales y de una sola unidad para las restauraciones definitivas obtenidos mediante un proceso de fresado asistido por computadora (CAD/CAM) para la fabricación de prótesis dentales fijas [32]. En la Tabla 1, se presenta un resumen de la composición de los materiales genéricos utilizados en el estudio.

Tabla 1. Resumen descriptivo de la composición de los materiales de para restauración dental utilizados.

Siglas	Composición
PMMA	Polímero sintético obtenido por adición de radicales libres y polimerización de Metacrilato de metilo a metacrilato de polimetilo.
GRA	Nanomaterial que tiene átomos de grafeno entre su estructura principal, con apariencia de panel bidimensional, Resina Acrílica con nanopartículas de Grafeno
RA	También conocido como polioximetileno (POM), termoplástico formado por la polimerización de formaldehído con estructura cristalina libre de monómeros.
PS	Polímero termoplástico de alto rendimiento, con biocompatibilidad alta.
ZGX	Circona tetragonal estabilizada con itria, de alta biocompatibilidad.
CDS	Circona endurecida con alúmina, libre de citotoxicidad

Fuente: elaboración propia.

2.2. Ensayo de resistencia a la compresión

Se realizó ensayos de compresión cuasiestática a las muestras, a una velocidad de 0,5 mm/min con una dirección paralela al eje mayor de la cara oclusal del primer molar, aplicando una precarga inicial de 10 N, las coronas fijas temporales y definitivas fueron sostenidas por un troquel maestro de metal no cementado (Ni-CR) y fijadas en la plataforma de una máquina de prueba universal (Shimadzu AGS-X Series Universal Testing Machine; Shimadzu, Tokio, Japón). Las muestras fueron sometidas a cargas hasta su fractura mediante un punzón piloto de acero endurecido con un diámetro de 3 mm aplicado en la parte central de la cara oclusal de la corona, registrando los valores de ruptura en Newtons (N) a través de un software de captación de datos conectado a la máquina de prueba Trapezium X Testing Software (Shimadzu, Tokio, Japón). Además de los valores máximos de ruptura, se llevaron a cabo análisis analíticos para determinar parámetros como los módulos de elasticidad, el esfuerzo máximo, el módulo

volumétrico de elasticidad y el módulo cortante [21,23].

2.3. Procesamiento de datos y análisis estadístico

Se utilizó estadística descriptiva e inferencial para evaluar la resistencia a la fractura de las restauraciones provisionales realizadas. Se utilizó un software estadístico (SPSS versión 27, Nueva York, NY, EE. UU.) para procesar los resultados con estadística descriptiva e inferencial, determinando cuál de ellos tenía mejores propiedades de resistencia a la fractura, se utilizó una prueba no paramétrica con el modelo estadístico de Kruskal-Wallis con un nivel de significancia del 5% para los materiales de restauración temporal y la prueba estadística prueba t de Student (Test-T) con un nivel de significancia del 5% para muestras independientes con diferentes varianzas fue aplicada para los materiales de restauraciones permanentes.

3. Resultados y Discusión

3.1.1. Análisis Descriptivo

En la Tabla 2 se muestra el análisis descriptivo del comportamiento de cada material ante la fuerza de compresión.

Tabla 2. Resumen descriptivo del ensayo de compresión (N).

Material	Media	σ	C.V.	Min	Max
PMMA	1302.71	223.04	17.1%	894.91	1468.43
GRA	1990.02	257.54	12.9%	1597.58	2312.32
RA	1796.2	146.03	8.1%	1569.81	1967.42
PS	2234.47	233.62	10.5%	1805.21	2434.29
CDS	1966.51	172.80	9.9%	1745.71	2186.61
ZGX	2387.41	516.10	21.6%	1563.52	3113.51

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Análisis Inferencial

En el análisis inferencial, se separaron estos cuatro biomateriales en parejas de tal manera que cada uno de ellos fuera comparado con el resto de los materiales, como se muestra en la Tabla 3. Las parejas que presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.005$) con respecto a la resistencia máxima a la fuerza de compresión. Siendo el grupo PMMA-RA, PMMA-GRA y PMMA-PS los que presentaron diferencias estadísticamente significativas, y los grupos RA-GRA, RA-PS y GRA-PS no presentaron tal diferencia [24].

Tabla 3. Resumen descriptivo del ensayo de compresión en materiales para restauraciones temporales.

Grupo 1 - Grupo 2	Prueba estadística	Prueba estadística SD	Significancia
PMMA-RA	14.000*	2680	0.007
PMMA-GRA	19.200	3676	0
PMMA-PS	-26.800	-5131	0
RA-GRA	5200	996	0.319
RA-PS	-12.800	-2451	0.014
GRA-PS	-7.600	-1455	0.146

(*) Muestran diferencias estadísticamente significativas Fuente: elaboración propia.

Como se aprecia en la Tabla 3 y con los resultados de la estadística inferencial no se aceptó la hipótesis nula ($t = -3,75$, valor $p = 0,003 < 0,05$). Luego se determinó, a un nivel significativo del 5%, que existían diferencias significativas entre CDS y ZGX.

2.3.1. Resistencia a la compresión

Los resultados del ensayo a la compresión revelaron diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes materiales como se observa en la Figura 1, el PMMA mostró un valor significativamente menor en comparación con los otros materiales, mientras que el PS exhibió el valor más alto. GRA y RA presentaron valores dentro de un rango similar, aunque superiores al PMMA. Estos hallazgos indican que los biomateriales GRA, RA y PS pueden considerarse opciones viables para restauraciones provisionales fresadas, ofreciendo alternativas más allá del PMMA. Los dos materiales para restauraciones temporales presentaron una fractura frágil. Una vez alcanzado el valor de tensión crítico, los materiales frágiles presentan grietas inestables, es decir, no requieren un aumento de tensión para la propagación espontánea de la grieta, y se produce una falla catastrófica.

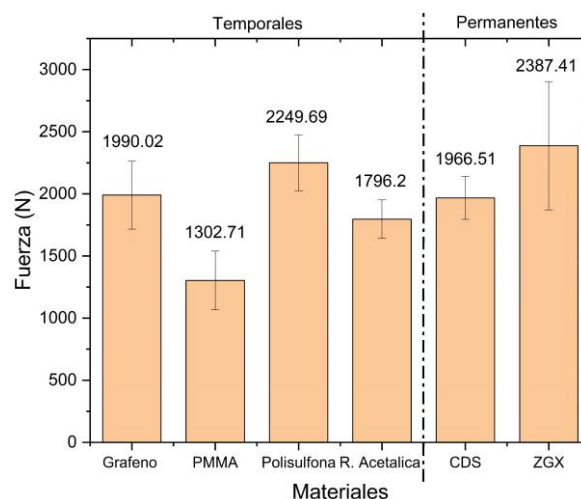


Figura 1. Diagrama de barras resistencia a la fuerza de compresión. Fuente: elaboración propia

Se realizó una comparación gráfica de curvas fuerza – desplazamiento de cada material ante la carga aplicada y se presentan en la Figura 2 para analizar el comportamiento de cada material bajo compresión hasta la fractura y de apreciar a la rigidez de cada material. En términos de deformación, el PMMA mostró una menor deformación, comportándose de manera similar al GRA. El material con el mayor porcentaje de deformación fue el PS, exhibiendo un comportamiento similar al RA. Se observó además que PMMA, GRA y RA tienen un comportamiento frágil, siendo RA el material con mayor porcentaje de deformación. Además, el GRA es el material que requiere mayor fuerza para romperse. Estos tres materiales experimentan fractura instantánea al alcanzar la fuerza máxima de rotura, clasificándose como materiales frágiles. En PS no muestra este comportamiento, después de alcanzar el valor límite elástico, el PS no llega a fracturarse; en su lugar, continúa deformándose plásticamente dentro de la geometría probada. Las coronas de circonio ZGX y CDS mostraron suficiente resistencia a la fractura cuando se usaron en las zonas de los molares y premolares, soportando cargas de fractura mayores que la fuerza masticatoria máxima. Se evidencia una rigidez mayor de estos materiales de restauración permanente comparados con los de restauración temporal. Se puede diferenciar 3 grupos por su comportamiento de rigidez, muy rígidos los materiales de base de Circonio, a continuación, en rigidez los materiales de pase polimérica de metacrilato, y al final los materiales de base polimérica con menor rigidez.

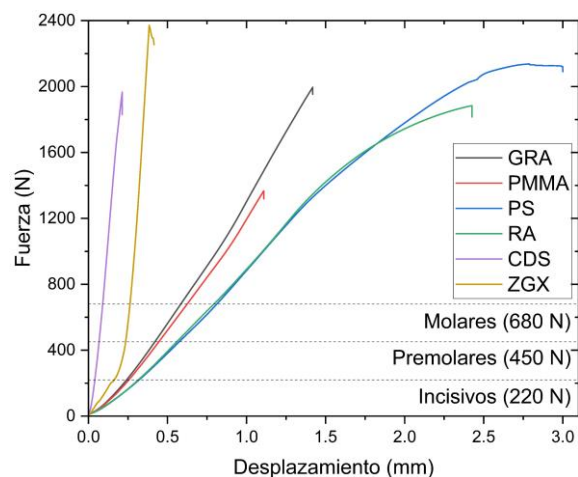


Figura 2. Comportamiento de la resistencia a la compresión de los materiales de restauración dental. Fuente: elaboración propia

2.3.2. Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad es esencial para determinar la rigidez de un material. Los materiales con un alto módulo de elasticidad, como los cerámicos, son menos deformables bajo carga, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren alta estabilidad dimensional. En contraste, los polímeros como el PMMA tienen módulos más bajos, lo que permite una mayor flexibilidad. Si comparamos todos los valores de módulo de rigidez de cada material son superiores a los materiales dentales naturales, siendo óptimos para las aplicaciones de restauración.

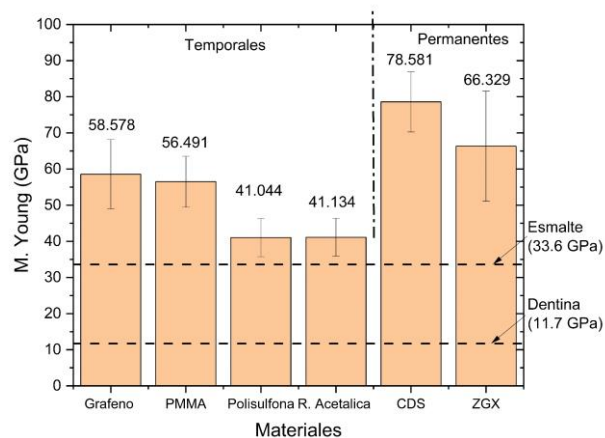


Figura 3. Comportamiento del módulo de young de los materiales de restauración dental. Fuente: elaboración propia

2.3.3. Aplicaciones Odontológicas

Polimetilmetacrilato (PMMA)

El PMMA se utiliza principalmente en prótesis removibles y bases de dentaduras debido a su fácil manipulación y bajo costo. Sin embargo, su uso está limitado por su baja resistencia a la fractura en comparación con otros materiales más avanzados.

Grafeno (GRA)

El grafeno, por su alta resistencia y conductividad, se está explorando para aplicaciones en ortodoncia y restauración dental. Los compuestos de grafeno pueden mejorar significativamente las propiedades mecánicas y funcionales de los materiales dentales tradicionales.

Resina Acetálica (RA)

La resina acetálica se utiliza en aplicaciones que requieren alta rigidez y resistencia al desgaste, como en retenedores y componentes de prótesis parciales. Su resistencia y durabilidad la hacen adecuada para soportar cargas masticatorias.

Polisulfona (PS)

La polisulfona es conocida por su resistencia a altas temperaturas y estabilidad química, lo que la hace útil en aplicaciones de impresión 3D para la creación de modelos y guías quirúrgicas. Además, su biocompatibilidad la hace adecuada para una variedad de aplicaciones dentales.

Zirconia (ZGX y CDS)

Los materiales de zirconia, como Zolid Gen X Amann Girrbach y Cercon HT Dentsply Sirona, se utilizan en restauraciones definitivas debido a su alta resistencia y excelente estética. Son ideales para coronas y puentes dentales en zonas de alta carga masticatoria.

4. Conclusiones

La selección de biomateriales adecuados para aplicaciones odontológicas depende de una comprensión detallada de sus propiedades mecánicas y biocompatibilidad. Una de las propiedades más importantes al momento de seleccionar un material dental es el módulo de elasticidad, ya que determina la capacidad del material para deformarse bajo cargas y regresar a su forma original. Por lo tanto, determinar el valor del módulo de elasticidad de cada material es fundamental para garantizar su eficacia en la restauración dental.

Los materiales cerámicos y compuestos avanzados, como aquellos reforzados con grafeno, ofrecen ventajas significativas en términos de resistencia y durabilidad. Estos materiales no solo presentan una alta resistencia a la fractura, sino que también mantienen su integridad estructural bajo las fuerzas masticatorias a

las que están sometidos los dientes. La incorporación de grafeno en polímeros como el polimetilmetacrilato (PMMA) ha demostrado mejorar sus propiedades mecánicas, haciendo que estos compuestos sean más resistentes y duraderos para aplicaciones temporales y definitivas en odontología. Además, los materiales CAD/CAM han ganado protagonismo debido a su precisión y capacidad para producir restauraciones dentales personalizadas de alta calidad. Estos materiales permiten la fabricación de coronas, puentes y otros dispositivos dentales con una exactitud y consistencia que no se podrían lograr con técnicas tradicionales.

La biocompatibilidad de los materiales dentales es crucial para evitar reacciones adversas en los tejidos vivos. Materiales como el zirconio han demostrado una excelente biocompatibilidad, promoviendo la integración ósea y minimizando la inflamación y el rechazo. El zirconio, utilizado principalmente en implantes dentales, es reconocido por su capacidad para integrarse perfectamente con el hueso, un proceso conocido como osteointegración. El zirconio, por su parte, es altamente resistente a la corrosión y presenta propiedades estéticas que la hacen ideal para restauraciones visibles. Los compuestos de grafeno también han mostrado buenos resultados preliminares en términos de biocompatibilidad. Estudios iniciales indican que el grafeno puede favorecer la proliferación celular y la regeneración tisular, aunque se necesita más investigación para confirmar su seguridad y eficacia a largo plazo en aplicaciones clínicas.

Elegir el mejor material para una aplicación odontológica no es una tarea sencilla, ya que intervienen varios factores, incluyendo las propiedades mecánicas, la biocompatibilidad, la durabilidad, la estética y el costo. Las propiedades mecánicas a menudo determinan la aplicación más idónea de estos materiales, ya que deben soportar las fuerzas masticatorias sin degradarse ni deformarse con el tiempo. La continua investigación y desarrollo en el campo de los biomateriales es esencial para optimizar su uso en la práctica clínica, asegurando tratamientos más efectivos y duraderos. La innovación en materiales como los compuestos avanzados y las tecnologías de fabricación asistida por computadora (CAD/CAM) está transformando la odontología, permitiendo a los profesionales ofrecer soluciones personalizadas y de alta calidad a sus pacientes.

Este estudio permitió determinar las propiedades mecánicas de diversos materiales de restauración dental, utilizando muestras de prueba de idéntica forma y dimensiones bajo las mismas condiciones de prueba de compresión. Además, se compararon los valores de dureza del esmalte y la dentina, obtenidos de estudios previos, con los de los materiales de restauración

dental. Los resultados de este estudio podrán ayudar a identificar qué materiales de restauración dental muestran propiedades mecánicas óptimas y valores de dureza cercanos a los del esmalte y la dentina, facilitando así la selección informada de materiales en la práctica clínica odontológica.

5. Agradecimientos

Nuestro agradecimiento para el Dr. Cristian Abad Coronel y el Grupo de investigación en materiales CAD/CAM y odontología digital de la facultad de Odontología, Universidad de Cuenca, por la apertura para el desarrollo de esta investigación.

6. Referencias

- [1] Chun K J and Lee J Y 2014 Comparative study of mechanical properties of dental restorative materials and dental hard tissues in compressive loads *J Dent Biomech* **5** 1758736014555246
- [2] Orsini G, Tosco V, Monterubbianesi R, Orilisi G and Putignano A 2020 A New Era in Restorative Dentistry *The First Outstanding 50 Years of "Università Politecnica delle Marche"* ed S Longhi, A Monteriù, A Freddi, L Aquilanti, M G Ceravolo, O Carnevali, M Giordano and G Moroncini (Cham: Springer International Publishing) pp 319–34
- [3] Khurshid Z, Zafar M, Qasim S, Shahab S, Naseem M and AbuReqaiba A 2015 Advances in nanotechnology for restorative dentistry *Materials* **8** 717–31
- [4] El Gezawi M, Wölfle U C, Haridy R, Fliefel R and Kaisarly D 2019 Remineralization, Regeneration, and Repair of Natural Tooth Structure: Influences on the Future of Restorative Dentistry Practice *ACS Biomater. Sci. Eng.* **5** 4899–919
- [5] Fajardo J I, Costa J, Cruz L J, Paltán C A and Santos J D 2022 Micromechanical Model for Predicting the Tensile Properties of *Guadua angustifolia* Fibers Polypropylene-Based Composites *Polymers* **14** 2627
- [6] Nomann N A, Polan M A A, Jan C M, Rashid F and Taleb A 2013 Amalgam and composite restoration in posterior teeth *Bangladesh Journal of Dental Research & Education* **3** 30–5
- [7] Mass E, Hassan A, Cohen O and Zilberman U 2017 Long-term in-vivo effect of various restorative materials on enamel and dentin of primary molars. *Quintessence International* **48**

- [8] Dong Q, Chow L C, Wang T, Frukhtbeyn S A, Wang F, Yang M and Mitchell J W 2014 A new bioactive polylactide-based composite with high mechanical strength *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **457** 256–62
- [9] Pereverzyev V 2022 Digital Dentistry: A Review of Modern Innovations for CAD/CAM Generated Restoration
- [10] Ahmad S, Hasan N, Fauziya, Gupta A, Nadaf A, Ahmad L, Aqil Mohd and Kesharwani P 2022 Review on 3D printing in dentistry: conventional to personalized dental care *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition* **33** 2292–323
- [11] John A and Hegde M N 2022 Comparative evaluation of compressive strength and flexural strength of newer posterior composites: an in-vitro study *International Journal of Clinical Dentistry* **15** 139–49
- [12] Peskersoy C and Culha O 2017 Comparative Evaluation of Mechanical Properties of Dental Nanomaterials *Journal of Nanomaterials* **2017** 1–8
- [13] Samuel S P, Li S, Mukherjee I, Guo Y, Patel A C, Baran G and Wei Y 2009 Mechanical properties of experimental dental composites containing a combination of mesoporous and nonporous spherical silica as fillers *dental materials* **25** 296–301
- [14] Goudouri O M, Kontonasaki E, Theocharidou A, Kantiranis N, Chatzistavrou X, Koidis P and Paraskevopoulos K M 2011 Dental ceramics/bioactive glass composites: characterization and mechanical properties investigation *Bioceramics development and applications* **1** 1–4
- [15] Zhang Y-R, Du W, Zhou X-D and Yu H-Y 2014 Review of research on the mechanical properties of the human tooth *International journal of oral science* **6** 61–9
- [16] Im Y W, Jun S K, Kim S C, Kim D A, Kim G R, Kim N S and Lee H H 2015 Standardized test methods for mechanical properties of dental prosthetic/restorative materials and their applications *Kor J Dent Mater* **42** 259–70
- [17] Suryawanshi A and Behera N 2022 Dental composite resin: a review of major mechanical properties, measurements and its influencing factors *Materialwissenschaft Werkst* **53** 617–35
- [18] Compton B G and Lewis J A 2014 3D-printing of lightweight cellular composites *Advanced materials* **26** 5930–5
- [19] Bayne S C 2012 Correlation of clinical performance with ‘in vitro tests’ of restorative dental materials that use polymer-based matrices *Dental materials* **28** 52–71
- [20] Reza Rezaie H, Beigi Rizi H, Rezaei Khamseh M M and Öchsner A 2020 Dental Restorative Materials *A Review on Dental Materials Advanced Structured Materials* vol 123 (Cham: Springer International Publishing) pp 47–171
- [21] Abad-Coronel C, Calle C, Abril G, Paltán C A and Fajardo J I 2023 Fracture Resistance Analysis of CAD/CAM Interim Fixed Prosthodontic Materials: PMMA, Graphene, Acetal Resin and Polysulfone *Polymers* **15** 1761
- [22] Apostu A M, Sufaru I-G, Tanculescu O, Stoleriu S, Doloca A, Ciocan Pendefunda A A and Solomon S M 2023 Can Graphene Pave the Way to Successful Periodontal and Dental Prosthetic Treatments? A Narrative Review *Biomedicines* **11** 2354
- [23] Abad-Coronel C, Paladines Á, Ulloa A L, Paltán C A and Fajardo J I 2023 Comparative Fracture Resistance Analysis of Translucent Monolithic Zirconia Dioxide Milled in a CAD/CAM System *Ceramics* **6** 1179–90
- [24] Vagkopoulou T 2009 Zirconia in dentistry: part 2. Evidence-based clinical breakthrough
- [25] De Souza G M 2015 Nanoparticles in Restorative Materials *Nanotechnology in Endodontics* ed A Kishen (Cham: Springer International Publishing) pp 139–71
- [26] Chen C 2013 *Zirconia-reinforced dental restorations* PhD Thesis (Universiteit van Amsterdam [Host])
- [27] Pileickiene G and Surna A 2004 The human masticatory system from a biomechanical perspective: a review *Stomatologija* **6** 81–4
- [28] Müller F, Heath M R and Ott R 2002 Maximum bite force after the replacement of complete dentures *J of Oral Rehabilitation* **29** 888–9

- [29] Vaidya A and Pathak K 2019 Mechanical stability of dental materials *Applications of nanocomposite materials in dentistry* (Elsevier) pp 285–305
- [30] Wang L, D’Alpino P H P, Lopes L G and Pereira J C 2003 Mechanical properties of dental restorative materials: relative contribution of laboratory tests *Journal of Applied Oral Science* **11** 162–7
- [31] Ferracane J L 2013 Resin-based composite performance: are there some things we can’t predict? *Dental materials* **29** 51–8
- [32] Spitznagel F A, Boldt J and Gierthmuehlen P C 2018 CAD/CAM Ceramic Restorative Materials for Natural Teeth *J Dent Res* **97** 1082–91