



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE
ODONTOLOGÍA

FACULTAD DE ODONTOLOGÍA

Doctorado en Odontología

Trabajo de Tesis para optar al Título de Doctor en
Odontología

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES DE UN YESO DENTAL TIPO IV PREPARADO EN FORMA TRADICIONAL CON OTROS OBTENIDOS A PARTIR DE SU MEZCLA CON POLÍMEROS ACRÍLICOS DE BASE ACUOSA

Doctoranda: Od. Esp. Verónica Villegas Crespo

Director: Prof. Dr. Juan Carlos Albera

Co-director: Prof. Dr. Alberto Martín

Mendoza - Argentina

2025

COMISIÓN DE TESIS

DR. CLAUDIO CAREGLIO

DRA. GRACIELA PEÑA

DR. MILTON AGUILERA

JURADO DE TESIS

DR. CLAUDIO CAREGLIO

DRA. GRACIELA PEÑA

DR. GUSTAVO MOLINA

DEDICATORIAS

La culminación de esta tesis es un acto de amor y resiliencia que trasciende las ausencias.

A la memoria de mi hija Frida, cuyo breve pero valiente paso por este mundo redefinió el significado de la vida.

A mis hijos, Zoe y Tadeo, luces que iluminan mi presente y mi futuro. A Nicolás, por su apoyo permanente e incondicional.

A mis padres, por su soporte y contención.

A todos ellos dedico esta tesis, por ser la manifestación más pura y sublime del amor.

AGRADECIMIENTOS

Este logro ha sido posible gracias al apoyo incondicional de mis seres queridos y la experticia colaboración de mis guías.

Mi gratitud y admiración al Dr. Juan Carlos Albera, por su acompañamiento constante, liderazgo científico y su valoración certera en cada etapa del proceso. Su visión, dedicación y paciencia fueron los pilares que orientaron y materializaron el desarrollo de esta tesis.

Agradezco al Diseñador Industrial Nicolás Cuartas y al Sr. Marcelo Del Póppolo, cuya colaboración fue indispensable para la ejecución de los ensayos, al Dr. Walther Zavala, firme impulsador; y al Dr. Ricardo Macchi, por su desinteresada colaboración.

Deseo extender mi agradecimiento a los laboratorios e instituciones que facilitaron el acceso a la infraestructura y el equipamiento avanzado como el Laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ingeniería de UNCUIYO, Laboratorio de Biomateriales de la Facultad de Odontología de la UBA, Centro de Investigaciones Odontológicas (CIO) de la Facultad de Odontología UNCUIYO, al personal del laboratorio de prótesis dental Viana y a todo aquel que colaboró para que esto fuera posible.

Finalmente, agradezco a mi familia, amigos y a mi equipo, cuyo amor y paciencia fueron el refugio que me permitieron superar las tempestades para culminar este trabajo.

ÍNDICE

DEDICATORIAS	3
AGRADECIMIENTOS	4
ÍNDICE	5
RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
Yesos dentales.....	11
Clasificación de los yesos dentales.....	13
Fabricación.....	15
Fraguado.....	17
Propiedades.....	18
Manipulación, variables que afectan el fraguado.....	20
Relación polvo/agua.....	21
Tiempo de mezclado.....	22
Tipo de agua utilizada.....	24
Adición de productos.....	24
Polímero estireno acrílico.....	27

Propósito del trabajo	30
Propiedades por evaluar	31
OBJETIVO GENERAL	37
Objetivos específicos	37
MATERIALES Y MÉTODOS	38
Equipamiento e instrumental	40
Propiedades ensayadas	43
Dureza superficial.....	43
Expansión lineal de fraguado	48
Resistencia a la compresión.....	51
Resistencia Compresiva Diametral o Resistencia a la tracción (método indirecto).....	53
Resistencia a la flexión.....	55
Reproducción de detalle.....	57
Resistencia al desgaste	60
Análisis estadístico.....	65
DISCUSIÓN	73
CONCLUSIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	99

Anexo 1: Certificados	99
Anexo 2: Publicación en revista científica y enlaces de acceso	100

RESUMEN

En este estudio se evaluó el impacto de la incorporación de polímeros estireno-acrílicos en proporciones variables (12.5 % y 25 %) sobre siete propiedades clave de yesos dentales tipo IV, incluyendo la expansión lineal de fraguado, la dureza superficial, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la resistencia a la tracción, la reproducción de detalles y la resistencia al desgaste. Para esto, se siguió la normativa ISO 6873: 2013, que dicta la forma de medir las propiedades de los yesos dentales.

Con respecto a los resultados obtenidos, se puede afirmar que, en relación con la dureza, si bien se observó un incremento numérico, no hubo diferencias estadísticamente significativas ($P > 0.05$). Respecto a la expansión lineal de fraguado, la adición de polímero redujo significativamente la expansión ($P < 0.05$), mejorando la estabilidad dimensional. En cambio, la resistencia a la flexión en los grupos adicionados con el polímero mostró una disminución significativa en comparación con el yeso tradicional, sin diferencias entre las concentraciones del 12.5 % y 25 %. Por otro lado, la resistencia a la compresión también disminuyó significativamente ante la adición del polímero. Finalmente, la reproducción de detalles cumplió con estándares aceptables, sin cambios notables debido al polímero y la resistencia al desgaste se incrementó de manera marcada.

La adición de polímeros estireno-acrílicos mejora la estabilidad dimensional y muestra tendencias positivas en dureza, pero reduce la resistencia a la flexión. Estos hallazgos sugieren un balance complejo entre beneficios y limitaciones, resaltando la necesidad de optimizar la formulación para lograr un equilibrio óptimo en las propiedades mecánicas y dimensionales del yeso dental tipo IV.

Palabras clave: Yeso dental tipo IV; polímeros estireno-acrílicos; propiedades mecánicas.

ABSTRACT

In this study, the impact of incorporating styrene-acrylic polymers in variable proportions (12.5 % and 25 %) on seven key properties of Type IV dental gypsum (dental stone) was evaluated, including linear setting expansion, surface hardness, compressive strength, flexural strength, tensile strength, detail reproduction, and wear resistance. For this purpose, the ISO 6873: 2013 standard, which dictates the procedure for measuring the properties of dental gypsums, was followed.

Regarding the results obtained, it can be stated that, in terms of hardness, although a numerical increase was observed, no statistically significant differences were found ($P > 0.05$). With respect to linear setting expansion, the addition of polymer significantly reduced expansion ($P < 0.05$), improving dimensional stability. In contrast, flexural strength in the polymer-added groups showed a significant decrease compared with the traditional gypsum –with no differences between the 12.5 % and 25 % additions. Compressive strength, meanwhile, also decreased significantly with the addition of polymer. Finally, detail reproduction met acceptable standards, with no notable changes attributable to the polymer, and wear resistance increased markedly.

The addition of styrene–acrylic polymers enhance dimensional stability and shows positive trends in hardness but reduces flexural strength. These findings suggest a complex balance between benefits and limitations, highlighting the need to optimize the formulation to achieve an optimal equilibrium between the mechanical and dimensional properties of Type IV dental gypsum.

Keywords: Type IV Dental Gypsum; Styrene-acrylic Polymers; Mechanical Properties.

INTRODUCCIÓN

Los modelos de trabajo dentales utilizados durante la confección de los distintos dispositivos destinados a restaurar las alteraciones presentes en los pacientes deben conservar las condiciones ideales con las que fueron generados.

Los materiales plásticos empleados para su elaboración deben reproducir con exactitud las dimensiones del molde original y mantener dicha estabilidad a lo largo del tiempo.

Una vez solidificados, deben resistir rayaduras y desgastes durante la manipulación, copiar con precisión los detalles más finos y evitar fracturas en zonas delgadas o aisladas, tanto durante su desmolde, etapa en la que intervienen fuerzas de tracción y posibles desalineaciones con respecto al eje de retiro, como durante el uso clínico o de laboratorio.

Asimismo, durante la manipulación en el laboratorio, estos modelos deben soportar fuerzas compresivas sin presentar fallas, especialmente en áreas críticas como los bordes de las preparaciones dentales.

A fin de optimizar estas exigencias, la industria dental ha desarrollado diversos materiales destinados a mejorar las prestaciones de los modelos de trabajo.

Históricamente, los yesos dentales han demostrado el mejor desempeño y continúan siendo los materiales de elección. No obstante, aquellos destinados a la confección de aparatología protética suelen verse afectados por el proceso de manipulación; esto resulta en roturas de bordes finos, rayaduras o fracturas que los vuelven irre recuperables. Dichos daños provocan desajustes en los aparatos elaborados o incluso la pérdida del trabajo clínico previo del

odontólogo, factores que han motivado el interés en la realización de este estudio.

En la actualidad, el desarrollo de nuevas tecnologías tales como el *CAD/CAM* dental que son las siglas en inglés para Diseño Asistido por Computadora (*Computer-Aided Design*) y Fabricación Asistida por Computadora (*Computer-Aided Manufacturing*) se presentan como una alternativa para su sustitución. Estas tecnologías están compuestas por escáneres, computadoras dotadas de software especiales y procesadores que actúan por fresado o impresoras que lo hacen por adición. Sin embargo, reportes comerciales indican que su penetración en los mercados de países desarrollados no supera el 35%, con una proyección de crecimiento de entre el 10% y el 11% para los próximos cinco años. En América Latina, este porcentaje es significativamente inferior; si bien se estima un incremento en los grandes centros urbanos de Brasil y Argentina, las cifras de utilización se mantienen por debajo de las mencionadas anteriormente.

Organismos internacionales como la *International Organization for Standardization* (ISO), el *American National Standards Institute* (ANSI) y la *American Dental Association* (ADA), han establecido normas y lineamientos específicos que definen los requisitos que deben cumplir los materiales utilizados para la confección de modelos, así como las pautas para su evaluación.

Yesos dentales

El yeso es un material cerámico ampliamente utilizado desde la antigüedad. Se encuentra en la superficie terrestre como una piedra natural denominada *aljez*.

Químicamente, en su estado natural, es sulfato de calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Su transformación en un material aglomerante se logra mediante calcinación, a través de un calentamiento rápido y directo del sulfato

de calcio dihidratado al aire libre, lo que da lugar a un polvo con partículas porosas irregulares y débiles, debido a la pérdida de parte de su agua de hidratación, convirtiéndose en hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) por eliminación de una molécula y media de agua^{1,2}.

Este calcinado puede ser controlado para producir la deshidratación parcial o completa y, según el procedimiento utilizado, obtener distintos tipos de hemihidratos α y β .

A partir de subproductos o productos de desecho de la producción de ácido fosfórico, también se pueden producir yesos sintéticos, los que, cuando su fabricación es correcta, poseen propiedades iguales o incluso mejores que las del natural¹.

Luego del calcinado, si se añade nuevamente agua al producto, el proceso anterior se revierte y en sus distintas versiones, estos materiales pueden ser utilizados en odontología, tanto en la clínica como en el laboratorio de prótesis. De hecho, representan el grupo de materiales con mayores aplicaciones utilizados en nuestro campo¹.

La calidad y las propiedades de los yesos dependen de la pureza de la materia prima, el método y tiempo de cocción, el grado de molienda, la mezcla de distintos tipos de yeso, así como de los aditivos utilizados.

Actualmente, bajo el término de “productos del yeso” se hace referencia a varias formas de sulfato cálcico hemihidratado fabricadas por calcinación del sulfato cálcico dihidratado.

La obtención de un yeso mejorado se logra calcinando el sulfato de calcio en una solución de cloruro de calcio para obtener partículas regulares, densas, pequeñas y resistentes³⁻⁶.

Durante el procesamiento industrial del mineral, el yeso se muele y somete a temperaturas de entre 20 y 300 °C aproximadamente, para eliminar parte del agua de cristalización.

A medida que se aumenta la temperatura en un rango de entre 45 y 90 °C el agua de cristalización se elimina y el producto que se forma es un sulfato cálcico hemihidratado el cual es estable a temperatura ambiente y en condiciones de sequedad.

La hidratación puede ocurrir cuando las partículas se exponen a una atmósfera con alta presión de vapor de agua.

Una segunda transformación en sulfato cálcico hexagonal α ocurre entre los 75-105 °C, siendo inestable por debajo de los 75 °C, donde rápidamente se rehidrata.

La tercera transformación de hexagonal a ortorrómbica ocurre por encima de los 300 °C y es una forma deshidratada estable⁷.

Según la técnica de calcinación utilizada, se obtienen diferentes formas de hemi-hidrato que reciben el nombre de hemihidrato α , hemihidrato α -modificado o hemihidrato β . La única diferencia entre ellos es morfológica, es decir, tamaño de los cristales, superficie y grado de perfección de la red¹.

El yeso manipulado adecuadamente sigue siendo el material que presenta mejores propiedades físicas para realizar un modelo fiable sobre el que confeccionar una prótesis dental correctamente adaptada al paciente, superando a los modelos de resina epóxica y poliuretano^{4,8-11}.

Dada la variedad de productos de yeso presentes en el mercado, en virtud de sus propiedades, fueron clasificados en distintas categorías, cada una de las cuales debe cumplir con determinados requisitos.

Clasificación de los yesos dentales

La clasificación más utilizada se basa en las normas determinadas por la (ISO), (ANSI) y la (ADA), bajo la nominación de normas ISO 6873:2013 y ANSI-ADA N°25 las cuales regulan los requisitos que deben cumplir los diferentes productos de yesos dentales presentes en el mercado en relación con sus propiedades, condiciones de uso y métodos de ensayo destinados a

analizar sus características particulares. Además, establecen la información referida al producto que deben incluir los envases como condiciones de almacenaje, relación polvo/agua, técnicas de mezclado y tiempo de fraguado, conforme a sus especificaciones^{4,12}.

Los valores pueden variar entre productos según su origen debido al tamaño de partícula resultante de la pulverización, a los componentes adicionados durante la fabricación y a los procesos de producción. Sin embargo, sus propiedades deben ajustarse dentro de un rango fijado por estos entes que determinan los estándares que deben cumplir de acuerdo con el uso al que serán destinados por la profesión^{2,7,13,14}.

En base a estas normas, los yesos dentales se clasifican en cinco categorías, basadas en su proceso de elaboración, propiedades y uso:

Tipo I: para impresiones.

Tipo II: para montaje de modelos y enmuflados.

Tipo III: para modelos de trabajo.

Tipo IV: para la preparación de troqueles para prótesis parcial fija, bases de modelos y matrices CAD/CAM. Yeso piedra dental de alta resistencia o densa.

Tipo V: para modelos y troqueles. Yeso piedra dental de alta resistencia y expansión de fraguado.

A continuación, se describen brevemente estos cinco tipos de yesos:

1) Yeso tipo I o yeso de impresión: está compuesto por yeso de París al que se han agregado modificadores para regular el tiempo y la expansión de fraguado. En la actualidad, prácticamente no se utiliza para tomar impresiones dentales porque ha sido sustituido por materiales menos rígidos, como los hidrocoloides y elastómeros y por los escáneres intraorales. Su uso actual se centra en el montaje de modelos dentales en articuladores mecánicos.

2) Yeso tipo II o yeso para modelos: se utiliza en la actualidad principalmente para rellenar una mufla en la construcción de prótesis, cuando la expansión de fraguado no es crítica y la resistencia es adecuada (está dentro de los límites marcados en la norma). Es relativamente débil, lo que evidencia una resistencia de tan solo 9 MPa^{2,7,13}.

3) Yeso tipo III o yeso piedra: tiene una resistencia a la compresión a la hora de 20,7 MPa (3000 psi), pero no supera los 34,5 MPa (5000 psi). Se emplean para la confección de modelos en prostodoncia¹⁴.

Los materiales de los modelos deben ser duros y resistentes al desgaste ya que sus márgenes son sometidos a múltiples roces durante el modelado de los patrones de cera y durante las pruebas y los ajustes de las restauraciones confeccionadas sobre ellos en forma indirecta.

Puede aceptarse una ligera expansión de fraguado en los modelos que reproducen tejidos blandos, pero no cuando se incluye un diente¹⁵.

4) Yeso tipo IV o yeso piedra de alta resistencia: se denomina hemi-hidrato α del tipo densita y cumple mejor las exigencias requeridas para la confección de modelos de trabajo que los yesos tipo III. Sus partículas tienen forma cuboides y su menor área superficial permite obtener esas propiedades sin que se espese excesivamente la mezcla. No obstante, el requisito indispensable debe ser una adecuada reproducción del detalle superficial, que en muchas ocasiones no es compatible con todos los materiales de impresión^{8,16}.

5) Yeso tipo V o yeso piedra dental de alta resistencia y expansión: muestra una resistencia incluso mayor que el tipo IV, la que se consigue aumentando la proporción polvo/agua.

Fabricación

Con respecto al proceso de fabricación de los distintos tipos de yeso dental, se pone énfasis en que las condiciones de calcinación y los ambientes de

procesamiento determinan la morfología del hemihidrato obtenido y, en consecuencia, las propiedades físicas y mecánicas de cada producto.

Los dos primeros tipos de yeso están basados en el yeso París. Se producen mediante un proceso de calcinación en condiciones de sequedad, templándolo a una temperatura entre 120– 300 °C en un contenedor abierto. Este proceso genera partículas porosas e irregulares, de baja densidad, un área de superficie relativamente alta y pobre resistencia a la compresión, de tipo β hemihidratadas.

El yeso piedra o tipo III se produce por calcinación en autoclave (a una presión de 117 KPa y una temperatura de 123 °C durante 5-7 horas), donde se obtienen partículas menos porosas y más regulares que las de los yesos tipo I y II, correspondientes al hemihidrato α .

Los polvos de hemihidrato producidos por calcinación húmeda tienen una densidad aparentemente alta, un área de superficie relativamente pequeña y una mayor resistencia a la compresión. El yeso densita o tipo IV se obtiene mediante la ebullición del yeso en una solución acuosa al 30 % de cloruro de calcio y cloruro de magnesio. Posteriormente, los cloruros se eliminan mediante un lavado con agua en estado de ebullición (100 °C) y el producto resultante se muele hasta alcanzar el tamaño de partícula deseado.

El sulfato de calcio hemihidratado en presencia de agua a 100 °C no reacciona formando sulfato de calcio dihidratado, ya que a esta temperatura ambos tienen la misma solubilidad. El polvo obtenido con este proceso es el más denso de los cuatro. Generalmente, este material recibe el nombre de yeso piedra de alta resistencia o mejorado.

También se obtiene calcinándolo en autoclave en presencia de una pequeña cantidad de succinato sódico, procedimiento mediante el cual las partículas resultan menos porosas que con el procedimiento anterior.

Fraguado

El proceso de fraguado constituye una de las etapas fundamentales en el comportamiento de los yesos dentales ya que determina la transición desde una suspensión fluida hasta un sólido rígido capaz de reproducir detalles con estabilidad dimensional y resistencia adecuada. A continuación, se describen los mecanismos fisicoquímicos involucrados y los cambios estructurales que caracterizan esta transformación.

Cuando un hemihidrato se mezcla con agua en la proporción adecuada, se forma una suspensión líquida y manejable en la que se disuelve hasta formar una solución saturada que progresivamente aumenta su grado de sobresaturación hasta que precipita como dihidrato, lo que genera núcleos de cristalización que se multiplican y crecen en la suspensión, hasta que la reacción se detiene habiéndose formado un compuesto sólido.

La reacción de fraguado no es más que la reversión del proceso de fabricación. El producto de esta reacción será yeso dihidratado y liberación de calor, correspondiendo este último, al que se usó para su síntesis.

Durante el proceso de fraguado se pueden reconocer importantes cambios físicos que comienzan cuando la mezcla se presenta como un líquido viscoso, pseudoplástico y brillante, que fluye sin esfuerzo bajo la vibración. Posteriormente, la viscosidad se incrementa por el crecimiento de los cristales de yeso a expensas de la fase acuosa. A medida que dichos cristales crecen, la mezcla se hace plástica y ya no fluye bajo vibración, pero puede ser modelada.

En esta fase desaparece el brillo, continúa el crecimiento de cristales y la masa plástica se transforma en un sólido rígido, en principio débil y friable, pero que incrementa su resistencia conforme la fase sólida aumenta en volumen⁴.

El proceso de fraguado del yeso es una cristalización que genera presión de

crecimiento cristalino y liberación de calor (exotermia). La precipitación de nuevos cristales (esferulitas) causa que estos entren en contacto y ejerzan una fuerza de compresión mutua por la adición de nuevos iones. Los microcristales secundarios actúan como anclajes entre los cristales primarios¹⁷.

Propiedades

Las propiedades de los yesos dentales constituyen la base para comprender su comportamiento clínico y de laboratorio. Aunque cada parámetro puede analizarse individualmente, todas las propiedades físicas y mecánicas se encuentran estrechamente interrelacionadas y determinan el desempeño final de los modelos obtenidos. A continuación, definidos por las normas internacionales y desarrollados por la literatura especializada, se revisan las propiedades del yeso dental tipo IV, que es el que se utilizará en este estudio.

La evaluación de las propiedades de los yesos dentales tipo IV incluye parámetros que, aunque se analicen en forma separada, están estrechamente interrelacionados. Las normas ISO 6873/2013 y N°25 de ADA determinan, entre otros aspectos, los requisitos que deben cumplir los yesos dentales y establecen directrices sobre los métodos para evaluar sus propiedades.

La dureza aumenta desde que se hace la mezcla con agua hasta que se completa la hidratación del sulfato de calcio hemihidratado y luego permanece casi constante hasta que se evapora casi todo el excedente de agua de su superficie¹¹. Está directamente relacionada con la resistencia compresiva, siendo mayor al aumentar esta, pero no son propiedades coincidentes.

Según Darvell, la dureza varía entre marcas y puede ser afectada por la técnica de manipulación¹⁷.

La resistencia compresiva es la capacidad del yeso tipo IV para resistir fuerzas de aplastamiento. Posee un valor mínimo estandarizado de 35 MPa y está fuertemente influenciada por la manipulación, especialmente la relación

polvo/agua y el tipo de agua, así como por la adición de diversas sustancias que pueden mejorarla o perjudicarla. No es un valor constante, sino que puede verse alterado significativamente por diversos factores inherentes a su manipulación y formulación.

La resistencia húmeda se analiza en yesos fraguados que retienen agua residual. La resistencia seca se evalúa cuando ya se ha eliminado el exceso de agua. Generalmente, duplica el valor de la resistencia húmeda, que representa cerca del 40–50 % de la resistencia seca. Incluso pequeñas absorciones de agua (0,1–0,2 %) pueden provocar pérdidas significativas de resistencia.

La resistencia traccional se refiere a las fuerzas laterales de tracción. El yeso piedra tipo IV es frágil y presenta una marcada diferencia entre su resistencia traccional y su resistencia a la compresión.

La resistencia a la abrasión es mayor en los yesos piedra de alta resistencia (tipo IV) respecto a los yesos piedra tipo III, pero no es lo suficientemente confiable. Está intrínsecamente ligada a su dureza superficial y es esencial para la precisión de las restauraciones protésicas. La adición de agentes endurecedores suele producir mejoras limitadas siendo todavía un desafío para la investigación¹⁷.

En cuanto a la fidelidad de reproducción de detalles, los yesos deberían reproducir una ranura de 0,050 mm de ancho en una consistencia específica (según ADA N° 25).

Finalmente, la expansión de fraguado en este tipo de yeso oscila entre el 0,2 % y el 0,6 %, resultado de la presión de crecimiento cristalino.

El yeso dental tipo IV de alta resistencia se utiliza habitualmente para fabricar los modelos dentales finales debido a sus excelentes propiedades mecánicas, su gran resistencia a la abrasión y alta resistencia a la compresión, además de su alta precisión gracias a su baja expansión de fraguado en comparación con otros^{8,19}.

Manipulación, variables que afectan el fraguado

En esta sección, se desarrollan los aspectos vinculados con la manipulación del yeso dental y las variables que influyen directamente en su proceso de fraguado. Estas consideraciones son fundamentales, dado que cualquier alteración en la técnica operatoria o en la composición del material puede modificar de manera significativa sus propiedades físicas y mecánicas.

Las modificaciones en la composición química de los productos a base de yeso y/o su manipulación inducen cambios importantes en sus propiedades físicas y mecánicas. Diversos aditivos químicos, incorporados por el fabricante o durante la manipulación, actúan como retardadores o aceleradores del fraguado y afectan otras propiedades clave.

Por ejemplo, el cloruro de sodio reduce el tiempo de fraguado, pero simultáneamente incrementa la expansión. En contraste, una solución de sulfato de potasio al 4 % reduce ambos parámetros (tiempo de fraguado y expansión de fraguado). Estos aditivos alteran tanto la formación de los centros de cristalización como el tiempo de inducción y el crecimiento de los cristales, lo que resulta en la modificación del tiempo de fraguado y de otras propiedades.

El tiempo de fraguado (TF) es el lapso transcurrido desde el inicio de la mezcla hasta que el material ha adquirido suficiente resistencia para ser manipulado. Técnicamente, se considera que el material fraguado y apto para el retiro del molde está listo para su uso cuando su resistencia a la compresión alcanza al menos el 80 % de la resistencia final evaluada una hora después del vaciado.

Un tiempo de fraguado excesivamente rápido (TF corto) puede hacer que el yeso endurezca antes de que el operador complete su manipulación. Por otro lado, si es excesivamente lento, prolonga innecesariamente el tiempo de trabajo.

El tiempo de fraguado final (TFF) está determinado por el momento en el cual el material ha endurecido completamente y puede separarse del molde, lo que ocurre cuando se ha transformado el sulfato de calcio hemihidratado en dihidratado.

La absorción de humedad atmosférica durante el almacenamiento puede afectar al hemihidrato, transformándolo prematuramente en dihidrato y consecuentemente, alterando su tiempo de fraguado, su expansión y su resistencia mecánica.

Relación polvo/agua

Dos elementos que se deben tener en cuenta durante la manipulación son la proporción polvo/agua (P/A) y el tiempo de mezclado (TM). Estos son dos factores que permiten controlar el tiempo de trabajo (TT), definido como el lapso disponible para vaciar la mezcla en un molde, parámetro esencial en todas las aplicaciones del material.

La relación polvo/agua influye en la velocidad de fraguado y en consecuencia, en el tiempo de trabajo. Así, una mezcla con una alta proporción de polvo endurecerá más rápidamente ya que los núcleos de cristalización disponibles están más concentrados en un pequeño volumen.

El aumento de la relación polvo/agua provoca un incremento significativo de la fricción interna y determina una fuerte correlación negativa entre la resistencia de los materiales de yeso dental y su factor de pérdida. La proporción de agua es crítica puesto que más agua retrasa el contacto cristalino, resultando en una menor expansión total¹⁸.

Si se disminuye la proporción polvo/agua (g/ml) se facilita el manejo del material, pero se debilita la masa, aumentando la porosidad y la expansión de fraguado. Por el contrario, una alta relación polvo/agua produce una menor porosidad, lo que resulta en un material más resistente y con menor expansión^{7,19}.

El exceso de agua que no participa en la reacción de hidratación se evapora durante el fraguado y el secado, generando porosidades que disminuyen la densidad del producto final. Una mayor porosidad implica una menor concentración de cristales de dihidrato por unidad de volumen y por lo tanto, un material más débil.

La manipulación del yeso tipo IV requiere una proporción y técnica meticulosa para garantizar la obtención de modelos o troqueles de alta calidad. La relación polvo/agua (P/A) y la manipulación son aspectos críticos en la preparación de un modelo con este yeso, ya que incluso mínimas variaciones pueden inducir cambios dimensionales significativos, una mayor expansión y una reducción de la resistencia mecánica¹¹.

Finalmente, los cuidados durante su uso son determinantes para la conservación de sus propiedades y la precisión en la confección de los modelos. La correcta proporción de polvo/agua, la velocidad y el tiempo de espatulado resultan esenciales para conseguir resultados esperables²⁰.

La resistencia a la flexión se ve menos afectada que la resistencia a la compresión por las variaciones en la relación polvo/agua. Por eso, la resistencia de los productos derivados del yeso se expresa, por lo general, en términos de resistencia a la compresión, aunque se debe tener en cuenta también la resistencia a la tracción, como referencia complementaria para comprender las características globales de resistencia^{1,11}.

Propiedades como la resistencia compresiva y la dureza son inversamente proporcionales a la cantidad de agua, mientras que el tiempo de fraguado aumenta proporcionalmente con la cantidad de agua^{21,22}.

Tiempo de mezclado

En esta sección se describirá el Tiempo de Mezclado (TM) y su influencia sobre el comportamiento del yeso dental tipo IV. Esta variable operativa constituye un factor determinante en el proceso de fraguado, en la calidad final del material y en la estabilidad dimensional de los modelos obtenidos.

El Tiempo de Mezclado (TM) es el tiempo que transcurre desde la adición del polvo al agua hasta que se termina la mixtura. En general, cuando aumenta, se reduce el Tiempo de Trabajo (TT) y el Tiempo de Fraguado (TF).

También se ve reducido cuando se utilizan aparatos de mezcla. Al incorporarse el polvo al agua se pone en marcha la reacción química en la cual se forma algo de sulfato de calcio dihidratado, que posteriormente se disgrega en cristales más pequeños que actúan como nuevos núcleos, favoreciendo la precipitación subsecuente del sulfato.

Dado que un incremento en la velocidad de mezcla genera más núcleos, se requiere menos tiempo para la conversión del sulfato de calcio hemihidratado en dihidratado¹¹.

El mezclado debe producir una masa plástica, densa (libre de poros o aire) y con la consistencia apropiada para el llenado de la impresión. La duración y la técnica de mezclado son determinantes para las propiedades finales del material. Se debe seguir cuidadosamente las instrucciones del fabricante, lo cual incluye la proporción de polvo y agua, el tiempo y la técnica de mezcla correcta para evitar la inclusión de aire^{11,14}.

Si luego de realizar el vaciado del modelo se lo sumerge en agua, se produce un aumento en la expansión de fraguado conocido como expansión higroscópica^{7,14}.

Esta expansión es notablemente mayor que cuando el yeso fragua en condiciones atmosféricas; de hecho, puede ser aproximadamente el doble de su expansión normal. Por ejemplo, el yeso tipo IV que presenta una expansión de fraguado lineal de aproximadamente 0,05 % tiene una expansión higroscópica de 0,1 %^{1,11}.

Los materiales de impresión no deben sumergirse en ningún líquido inmediatamente posterior a la impresión, puesto que el dihidrato absorbe

cualquier elemento depositado sobre él pudiendo retrasar la reacción y aumentar la expansión.

En caso de tener que sumergirlo, se debe colocar trozos de yeso con anterioridad al agua para conseguir una solución saturada evitando la disolución del modelo y alteración de su superficie^{4,8}.

El yeso debe presentar estabilidad dimensional duradera, baja expansión lineal de fraguado y permitir una manipulación sencilla y eficaz. A su vez, debe ser compatible con los materiales de impresión, lo suficientemente duro para soportar los procesos de fabricación, resistente a abrasiones, con buena microdureza superficial, tener suficiente reproducción de detalles y ser estable en el tiempo²³⁻²⁵.

Tipo de agua utilizada

La influencia que ejerce el tipo de agua utilizada en la preparación del yeso dental es fundamental dado que su composición química puede modificar de manera directa la estructura cristalina, la resistencia mecánica y la estabilidad dimensional del material.

El uso de agua destilada produce valores de resistencia a la compresión más altos en comparación con el uso de agua de red.

La presencia de iones en el agua corriente puede interferir con la formación regular de la estructura cristalina del yeso, afectando la capacidad de los cristales para entrelazarse, dando lugar a una subestructura débil. La ausencia de iones en el agua destilada facilita una formación de cristales más uniformes generando estructuras densas y menos porosas que las obtenidas utilizando agua de red²⁶⁻²⁸.

Adición de productos

La incorporación de diversas sustancias al yeso dental modifica de manera directa su comportamiento físico y mecánico. En esta sección se analizan los

principales aditivos estudiados, su mecanismo de acción y su impacto sobre las propiedades fundamentales del yeso tipo IV, con el fin de comprender cómo estas modificaciones pueden optimizar –o comprometer– su desempeño clínico y de laboratorio.

Las modificaciones en la composición química del yeso dental producen cambios significativos en su comportamiento. Las impurezas o sales destinadas a reducir la expansión actúan como núcleos de cristalización y acortan el tiempo de trabajo^{2,11,24}.

Se ha demostrado que la incorporación de nanopartículas influye de manera directa en las propiedades mecánicas del yeso. En general, este tipo de aditivos tiende a modificar la resistencia a la compresión^{29,30}.

Las nanopartículas de plata (Ag) y óxido de zinc (ZnO) por ejemplo, reducen dicha resistencia, especialmente en condiciones secas, debido a la menor cohesión intercrystalina asociada a la disminución en la cantidad de cristales de yeso^{22,24,31}.

En contraste, las nanopartículas de óxido de aluminio (Al_2O_3) pueden aumentar significativamente la resistencia al actuar como refuerzo y disminuir la porosidad. Un estudio mostró que un 10 % en peso añadido al yeso tipo II alcanzó valores de 70 ± 2.1 MPa, superiores a los de un yeso tipo IV convencional (37.4 ± 1.8 MPa)³².

En relación con las formulaciones convencionales, el yeso tipo IV incorpora aditivos que disminuyen la expansión respecto del tipo V^{2,33,34}. Sin embargo, continúa siendo un material frágil y presenta una diferencia marcada entre su resistencia traccional y su resistencia a la compresión^{35,36}.

Se ha observado, que la adición de hipoclorito de sodio al 0,5 % en agua destilada puede aumentar su resistencia^{33,34,37}.

El proceso de fraguado es una reacción exotérmica que implica la conversión de hemihidrato de sulfato de calcio a dihidrato. Para controlar este proceso, la industria emplea sustancias específicas. Entre ellas, la solución antiexpansiva

compuesta por sulfato de potasio (acelerador) y bórax (retardador), capaz de reducir la expansión hasta valores cercanos al 0,05 %^{17,38,39}.

El yeso tipo IV mejorado se usa para la confección de modelos finales por su resistencia a la abrasión y compresión, además de su baja expansión^{8,19,40,41}. No obstante, pese a las ventajas derivadas de estas modificaciones, la incorporación de rellenos puede alterar de manera significativa las propiedades fundamentales del material^{3,42-44}.

Diversos estudios han evaluado la incorporación de nanopartículas de sílice, resinas epóxicas, poliuretano, plata, óxido de aluminio, óxido de zinc y otros compuestos. Si bien estos aditivos afectan de manera diversa las propiedades del yeso dental, hasta el momento no se ha establecido una formulación definitiva^{29,32,43-48}.

Se reconoce, además, el potencial de la nanotecnología para mejorar su desempeño, dado que las nanopartículas se distribuyen de manera más homogénea que las partículas de mayor tamaño^{30,40,49-51}.

Entre los aditivos con efectos específicos, la sílice coloidal incrementa la fluidez de la mezcla, permite reducir la proporción agua/polvo y aumenta la resistencia final al ocupar los espacios intercristalinos. Este aditivo mejora la dureza superficial, aunque no aumenta la resistencia a la abrasión¹⁷.

También se ha estudiado la impregnación del material con polimetacrilato de metilo, el cual incrementa la resistencia a la tracción, compresión y abrasión.

Este procedimiento es particularmente útil en modelos de estudio. Sin embargo, los resultados favorables se observaron únicamente en yesos tipo II o de taller⁵².

Otros intentos de modificación mediante glicerina y aceites no lograron aumentar la dureza superficial, aunque produjeron superficies más lisas y suaves¹¹. De modo similar, ciertos polímeros disueltos o cianoacrilatos rellenan microespacios y reducen la penetración de cera, mejorando levemente la resistencia a la abrasión. No obstante, la dureza permanece

prácticamente inalterada debido a la ausencia de una unión química efectiva entre los polímeros de cadena simple y los cristales. Por ello, para lograr mejoras significativas se requieren polímeros con estructuras reticuladas que limiten la deformación plástica¹⁷.

Finalmente, tal como señala el Dr. Macchi en su obra *Materiales dentales*, “la estructura de los materiales condiciona sus características. Estas propiedades representan el análisis de cómo se comporta un material ante diversos agentes”. Conocer y comprender dichas propiedades resulta esencial para optimizar su desempeño clínico⁴.

En síntesis, los yesos dentales tipo IV presentan propiedades relevantes para su uso odontológico, entre ellas: estabilidad volumétrica, fraguado rápido y controlable, propiedades térmicas y acústicas favorables, baja transferencia de calor, bajo peso y costo de producción, buena textura, alta fidelidad de copiado superficial, baja solubilidad en agua, baja conductividad, dureza, densidad adecuada, tiempo de trabajo apropiado, resistencia mecánica (flexotracción, dureza y compresión), baja expansión de fraguado, humedad total controlada, pH estable, color y apariencia uniformes y granulometría fina que contribuye a una mayor resistencia a la compresión.

Polímero estireno acrílico

El producto utilizado se define como una emulsión micelar acuosa de aspecto blanquecino. Se presenta en contenedores de 5 litros de polietileno de alta densidad, los cuales garantizan la estabilidad de sus propiedades fisicoquímicas.

La formación de polímeros se basa en la unión de monómeros mediante reacciones de polimerización donde pequeñas moléculas bifuncionales se enlazan para generar macromoléculas⁴.

Los monómeros deben ser reactivos en dos de sus extremos mínimamente para poder sujetarse a la cadena en formación y sostener al siguiente monómero o a la molécula de finalización.

La polimerización en emulsión se fundamenta en la acción de tensoactivos capaces de formar micelas, dando lugar a sistemas coloidales en los que una fase líquida discontinua se dispersa dentro de una fase líquida continua^{53,54}. Este proceso permite obtener dispersiones estables de polímeros estireno-acrílicos, ampliamente utilizadas en aplicaciones industriales y biomédicas por su versatilidad.

Los polímeros derivados del estireno pertenecen al grupo de los acrílicos y, en conjunto, a la familia de los plásticos. La *Society of the Plastics Industry* los describe como materiales constituidos parcial o totalmente por combinaciones de carbono con oxígeno, nitrógeno, hidrógeno u otros elementos orgánicos/inorgánicos, que pueden moldearse en distintas formas durante su procesado gracias a su comportamiento fluido en etapas tempranas de fabricación⁵⁵.

Su origen puede ser petroquímico o derivado de materias vegetales y proteicas.

Una vez polimerizados, ya sea en emulsión o en estado sólido, presentan baja toxicidad y requieren cuidados básicos de manipulación.

Estas dispersiones poliméricas ofrecen ventajas como resistencia química, ligereza, elasticidad, aislamiento, bajo costo y reciclabilidad; aunque presentan limitaciones, como baja resistencia térmica y a los rayos UV, escasa dureza superficial, mayor susceptibilidad a la abrasión y falta de biodegradabilidad. Los monómeros individuales (estireno, acrilonitrilo y ésteres acrílicos) pueden resultar irritantes, por lo que su manipulación industrial exige medidas de seguridad.

El polímero empleado en esta investigación (Durflex PPA, Argentina) actúa como promotor de adherencia y fluidificador en mezclas cementicias mejorando sus propiedades mecánicas y químicas. El fabricante recomienda las precauciones estándares de uso y manipulación: no ingerir, evitar el contacto con niños, lavar con agua ante salpicaduras y consultar al médico en caso de ingestión⁵⁶.

Dado que se trata de emulsiones acuosas, requieren protección con biocidas para prevenir el deterioro microbiológico.

Los polímeros estireno-acrílicos combinan la rigidez del estireno con la flexibilidad de los acrilatos permitiendo ajustar parámetros como resistencia mecánica, estabilidad térmica y comportamiento frente a la humedad. Su elevada dispersabilidad en medios acuosos facilita su incorporación en materiales como yesos dentales, cementos y pastas. Cuando se emplean en proporciones moderadas no interfieren con el fraguado y funcionan como modificadores mecánicos^{57,58}.

En el yeso dental tipo IV, estos polímeros pueden aumentar la resistencia a la compresión, disminuir la porosidad, mejorar la cohesión interna y controlar el tiempo de fraguado^{57,58} lo que los posiciona como una alternativa prometedora para optimizar modelos odontológicos. La rigidez aportada por el estireno y la capacidad plastificante de los acrilatos generan materiales con buena resistencia a la tracción y compresión, especialmente útiles en matrices frágiles como el yeso. Asimismo, su afinidad por sustratos minerales, favorecida por la presencia de grupos funcionales ácidos, mejora la adhesión a cargas inorgánicas⁵⁹.

Estos polímeros también confieren propiedades hidrofóbicas que reducen la absorción de agua, así como una menor porosidad interna al actuar como agentes aglutinantes o plastificantes, incrementando la resistencia al desgaste y a la abrasión superficial⁶⁰.

El estireno, componente fundamental de estos polímeros, es un líquido transparente e incoloro que puede obtenerse del petróleo y gas natural, aunque también está presente de manera natural en alimentos como café, frutillas, carne vacuna, avena y canela.

Su versión polimerizada, el poliestireno, constituye un material sólido, inodoro e inerte, comúnmente utilizado en aplicaciones sanitarias y alimentarias por su estabilidad. Es frecuente confundir el estireno líquido con el poliestireno sólido, aunque sus propiedades son marcadamente diferentes.

El olor característico del estireno puede detectarse a concentraciones muy bajas, sin representar riesgo para la salud. Estudios indican que el estireno libre posee una vida media corta, degradándose rápidamente en el aire y desapareciendo en superficies y aguas superficiales en lapsos breves. Asimismo, se ha demostrado que su presencia en agua potable es improbable⁶¹.

Propósito del trabajo

Esta investigación se llevó a cabo con el propósito de evaluar la incidencia de los polímeros estireno-acrílicos sobre las propiedades mecánicas del yeso dental tipo IV convencional con el fin de obtener una alternativa de yeso piedra mejorada.

El uso del yeso para modelos tipo IV (también denominado yeso piedra mejorado o densita) requiere de un control meticuloso de proporción polvo/ agua utilizada para la mezcla, una manipulación cuidadosa y una técnica rigurosa, para alcanzar modelos o troqueles de alta calidad.

Dada la relación polvo/agua indicada por el fabricante, el mezclado debe llevarse a cabo bajo condiciones de vacío para obtener una masa plástica, densa (libre de poros o aire) y cuya consistencia asegure el correcto vaciado de la impresión.

Propiedades por evaluar

El desempeño clínico y de laboratorio del yeso dental tipo IV depende directamente de un conjunto de propiedades físicas y mecánicas que determinan su estabilidad dimensional, su resistencia y su capacidad para reproducir detalles con precisión. Dado que el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la adición de polímeros estireno-acrílicos sobre el comportamiento del material, resulta indispensable analizar de forma sistemática aquellas propiedades que pueden modificarse por la incorporación de aditivos y que repercuten directamente sobre la calidad del modelo obtenido.

A continuación, se describen las principales propiedades seleccionadas para su evaluación, así como los fundamentos que justifican su inclusión en esta investigación.

- 1. Dureza superficial:** está directamente relacionada a la resistencia compresiva. Todos los factores que aumenten la dureza aumentarán también la resistencia y viceversa. Sin embargo, la dureza afecta solo la superficie, mientras que la resistencia afecta toda la masa.

El yeso dental tipo IV se utiliza comúnmente para modelos de trabajo precisamente por su alta resistencia y dureza. Debe resistir la abrasión y los arañazos durante la manipulación y la escultura de patrones de cera en el laboratorio.

El método Vickers, actualmente, es el método más utilizado y confiable para medir la dureza superficial. Se emplea un penetrador de diamante con forma de pirámide de base cuadrada. La geometría del indentador, la carga aplicada y el tiempo de aplicación deben generar una huella cuya superficie se mide mediante microscopía, calculando la dureza al dividir la carga (kgf) por el área de indentación (mm²).

Las ventajas del método Vickers con respecto a Rockwell, Brinell o Knoop se basan en que permite medir materiales blandos y duros, utiliza un único indentador y la probeta no se destruye pudiendo emplearse en otros ensayos^{22,62,63,48,20,21}.

Por otro lado, posee ciertos inconvenientes como por ejemplo, que la superficie de la probeta debe estar bien pulida y en buen estado ya que la medición es óptica. A su vez, es un método relativamente lento (30 a 60 segundos por probeta) y los equipos son costosos debido al sistema óptico requerido.

- 2. Expansión lineal de fraguado:** corresponde al cambio dimensional que experimenta el material durante su endurecimiento. En odontología, es esencial que los yesos presenten una expansión mínima para asegurar alta precisión en los modelos.

Respecto a la normativa, la *American Dental Association* (ADA) establece para los yesos piedra de alta resistencia valores de 0,00 a 0,01 (0–1 %), mientras que la normativa ISO señala que la expansión no debe superar 0,15 μm^{12} .

Diversos autores han empleado metodologías variadas para la medición de esta propiedad. Por ejemplo, Cruzado-Oliva et al. utilizaron probetas prismáticas rectangulares y un calibrador digital⁶².

Otros, como Heshmati et al., emplearon un medidor electrónico de expansión lineal con probetas de sección prismática triangular⁴¹.

También se ha documentado la medición de esta propiedad mediante un microscopio estereoscópico³⁰.

- 3. Resistencia a compresión:** es el esfuerzo máximo que un material puede soportar bajo cargas de compresión antes de fracturarse. En los yesos tipo IV esta propiedad es crucial ya que los modelos deben ser lo

suficientemente resistentes para soportar las fuerzas aplicadas durante los procedimientos de laboratorio.

Para los yesos tipo IV, la especificación ADA N°25 y la ISO 6873:1998 establecen que la resistencia a la compresión no debe ser inferior a 35 MPa (5076 psi) medida una hora después del fraguado.

La medición de la resistencia a la compresión se realiza con máquinas de ensayos de materiales universales. Sin embargo, se observa que distintos autores utilizan probetas de diferentes tamaños y formas^{30,35,40,62}.

- 4. Resistencia a la flexión:** se refiere a la capacidad de un material para resistir la deformación bajo cargas de flexión antes de fracturarse.

La resistencia transversal que es una forma de resistencia a la flexión que se calcula utilizando la fórmula $\sigma=3FL/2bd^2$, donde σ es la resistencia transversal, F es la carga máxima antes de la fractura, L es la distancia entre los soportes, b es el ancho de la probeta y d es su espesor. Se mide mediante una prueba de flexión de tres puntos.

El ensayo se lleva a cabo en una máquina universal de ensayos de materiales utilizando probetas con forma de prisma rectangular de 25 mm de largo x 12 mm de ancho y 3 mm de espesor.

Es importante notar que, aunque diferentes autores coinciden en la metodología experimental (prueba de tres puntos), no existe uniformidad en la forma y dimensiones de las probetas utilizadas⁹.

En cuanto a los estándares de calidad, un yeso tipo IV debe poseer una resistencia a la flexotracción superior a 35 kg/cm²¹².

- 5. Reproducción de detalle:** es la capacidad del material para replicar con exactitud las características finas de las estructuras evitando distorsiones en el modelo final.

Los yesos tipo IV presentan alta precisión debido a su baja expansión de fraguado y a su composición basada en partículas de α -hemihidrato de forma prismática y regular, lo que favorece la dureza, la resistencia a la abrasión y la reproducción de detalles finos.

Para la evaluación de esta propiedad, la especificación ADA N° 19 presenta un modelo maestro de acero inoxidable con líneas grabadas para evaluar la reproducción de detalles y establece los procedimientos estandarizados de prueba junto con la ADA N°25 y la ISO 6873:2013. Distintos autores describen modelos variados en cuanto a su conformación, aunque en todos los casos adhieren a las normas internacionales^{22,37}.

Se considera satisfactorio si el material reproduce de forma clara y continua un surco de 0,05 mm (50 μ m). Actualmente, la mayoría de los yesos disponibles cumplen o superan este requisito¹².

- 6. Resistencia al desgaste:** es una propiedad fundamental que determina la durabilidad y precisión de los modelos y troqueles utilizados en la fabricación de prótesis dentales. Se evalúa principalmente a través de la dureza superficial.

Una baja resistencia al desgaste podría alterar los márgenes de las preparaciones o los puntos de contacto comprometiendo el ajuste final de la prótesis.

Para evaluar esta propiedad se utiliza un raspador cilíndrico de punta cónica unido a un motor de 5 RPM que genera un proceso de frotamiento mecánico a una velocidad y tiempo determinado, tras lo cual se determina la cantidad de material desgastado en la superficie de la muestra mediante el pesaje de las probetas previo y post desgaste.

Peyton, presentó en su ensayo una máquina que constaba de un disco abrasivo giratorio y un brazo con capacidad de carga variable que utilizaba

diferentes velocidades. La pérdida de peso se determinaba mediante pesajes iniciales y finales después de someter las muestras a cargas definidas durante tiempos fijos, a las mismas velocidades de rotación y con el mismo grano abrasivo⁷¹.

HIPÓTESIS

La adición de un polímero acrílico de base acuosa al yeso tipo IV mejora sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas, incrementando así la confiabilidad del producto final y facilitando su uso.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la incorporación de un polímero estireno-acrílico en el yeso tipo IV, considerando tanto la mejora de sus propiedades como la influencia de diferentes proporciones de resina sobre sus características iniciales.

Objetivos específicos

1. Evaluar los cambios de la expansión lineal de fraguado en las probetas de yeso obtenidas por procedimientos estándares, al mezclarlos con agua y con adición de polímeros estireno-acrílicos de base acuosa y su compatibilidad con las normas internacionales (ISO 6873:2013 y ANSI/ADA N° 25).
2. Determinar la incidencia de la adición de polímeros acrílicos de base acuosa en la dureza, resistencia a la fractura por compresión, tracción y flexión, y al desgaste de un yeso tipo IV de uso odontológico.
3. Analizar la reproducción de detalles de un yeso tipo IV mezclado con polímero estireno acrílico y del mismo yeso preparado de manera convencional.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se desarrolló bajo un diseño experimental completamente aleatorizado, de tipo unifactorial, con el objetivo de evaluar la influencia de la incorporación de un polímero estireno-acrílico en diferentes proporciones sobre las propiedades físicas y mecánicas de un yeso dental tipo IV.

El factor independiente correspondió al uso y concentración del polímero agregado, estableciéndose tres niveles experimentales:

Grupo control (A): yeso tipo IV con agua bidestilada.

Grupo experimental (B): yeso tipo IV con 12,5 % de polímero estireno-acrílico.

Grupo experimental (C): yeso tipo IV con 25 % de polímero estireno-acrílico.

Para la obtención de las concentraciones de polímero estireno-acrílico al 12,5% y 25%, se dosificaron las cantidades correspondientes en una probeta graduada, adicionando el agua destilada necesaria según la relación agua/polvo establecido (23 ml/100 g). La mezcla se homogeneizó mediante agitación manual con varilla de vidrio durante 60 segundos y se empleó de forma inmediata para la preparación del yeso y la posterior confección de los especímenes de ensayo.

En cada grupo se determinaron las siguientes variables dependientes: dureza superficial, expansión lineal de fraguado, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, resistencia al desgaste y reproducción de detalles.

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis estadístico inferencial,

verificando previamente los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía para comparar los valores medios entre los tres grupos experimentales en cada propiedad evaluada. En los casos en que se detectaron diferencias significativas ($P < 0,05$), se efectuaron pruebas de comparación múltiple (Tukey) para identificar entre qué grupos se producían dichas diferencias. El nivel de significación estadística adoptado fue $P (\alpha) = 0,05$.

A continuación, se describen los materiales y los métodos empleados para la manipulación del yeso dental tipo IV y la posterior evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas.

El material base seleccionado fue un yeso tipo IV de baja expansión, comercialmente denominado Silky Rock (Whip Mix Co. Illinois) clasificado como yeso piedra mejorado conforme a las normativas vigentes ISO 6873:2013 y ANSI/ADA N°25.

Las condiciones de transporte, de envasado, de control de calidad de los envases con posterioridad a su fraccionamiento y de almacenamiento no estuvieron al alcance de la autora del trabajo hasta el momento de la adquisición del producto.

Desde el momento de la obtención del producto, se mantuvieron las condiciones de manipulación especificadas por el fabricante en el etiquetado del envase, esto es: relación polvo/agua de 23 ml/100 g, tiempo de espatulado mecánico de 20 a 30 segundos (450 RPM) lo cual otorga un tiempo de trabajo de 3 a 6 minutos y 10 de fraguado y genera una expansión de fraguado de 0.09 %.

En base a estos elementos, se realizaron los procedimientos necesarios para evaluar los cambios que la adición del polímero podía generar en algunas propiedades de este material.

Se fijó como criterio que el límite de tiempo de caducidad del yeso utilizado debía ser verificado 180 días posteriores al momento de uso. Para su almacenamiento, se siguieron las directivas del fabricante.

La elaboración de las muestras se efectuó en un laboratorio de prótesis dental privado a una temperatura controlada de $(24 \pm 2) ^\circ\text{C}$ y $50 (\pm 10) \%$ de humedad relativa.

El polímero estireno acrílico no presenta fecha de caducidad informada por el fabricante en el etiquetado correspondiente, aunque sí especifica indicaciones precisas de almacenamiento en lugares frescos y ventilados al resguardo de la radiación solar directa y de bajas temperaturas dentro de los envases originales y bien cerrados, advirtiendo que, de no cumplirse estas recomendaciones, el material podría deteriorarse y perder sus propiedades.

Antes de los ensayos, el material y los aparatos utilizados en el proceso se mantuvieron durante al menos 15 horas, a la temperatura mencionada, tal como indica la Norma ISO 6873:2013.

En el momento de ser utilizados, se controló que el instrumental y equipamiento estuvieran limpios, secos y libres de partículas de yeso u otro material.

Equipamiento e instrumental

La manipulación de los materiales y la ejecución de los ensayos fueron realizados exclusivamente por la autora del presente estudio, asegurando la consistencia en el procedimiento experimental. Sin embargo, para la determinación de las propiedades mecánicas, específicamente los ensayos de compresión, se contó con asistencia técnica especializada para la operación de la Máquina Universal de Ensayos (Instron), garantizando la correcta calibración y la aplicación de los protocolos de la normativa vigente.

- Balanza de precisión marca Denver con capacidad para pesar desde 0.1 g hasta 200 g utilizada para determinar la cantidad exacta de yeso tipo IV para la preparación de las distintas probetas de ensayo.
- Probeta de vidrio, calibrada, fabricada bajo la Norma DIN (*Deutsches Institut für Normung*) en ISO 4788, de 50 ml de capacidad, para la medición del agua y el polímero.
- Mezclador al vacío Tecnodent Mixer 804 con sistema de vacío por depresión neumática y acople de rotación de 425 RPM. (Tecnodent, Argentina).
- Espátula para mezcla manual de yesos.
- Loseta de vidrio.
- Vibradora automática de alta frecuencia y baja amplitud (Tecnodent, Argentina).

Parte del equipamiento descrito se observa en la figura N° 1.



Figura N°1: Equipamiento: Mezcladora de vacío. Balanza de precisión.
Probeta de vidrio, calibrada, con polímero.

Para el análisis de las propiedades evaluadas, se utilizaron un total de 30 probetas (N=30) elaboradas con características específicas para cada

ensayo. Los especímenes fueron divididos en tres (3) grupos experimentales de 10 muestras cada uno, según la composición de la mezcla:

1. En el primero (Grupo A) el yeso densita tipo IV se mezcló con agua bidestilada.
2. Para constituir el Grupo B, con igual número de probetas, se utilizó el mismo yeso mezclado con una emulsión acuosa de Polímero Estireno Acrílico al 12,5 % en reemplazo del agua bidestilada.
3. El Grupo C, con la misma cantidad de muestras, se preparó mezclando el yeso con la emulsión acuosa del polímero al 25 %.

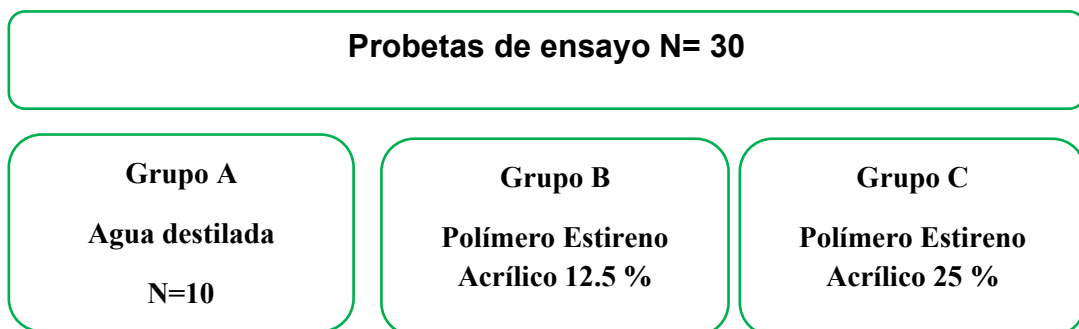
El tamaño muestral para los diferentes ensayos se determinó mediante un análisis de potencia estadística *a priori* utilizando el software G*Power (versión 3.1.9.7). Para el cálculo, se seleccionó la familia de pruebas F (ANOVA de un factor: efectos fijos, ómnibus) bajo el supuesto de una magnitud de efecto (f) de 0.55, considerada como un efecto de gran magnitud según los criterios de Cohen.

Esta estimación de la magnitud del efecto se fundamentó en la naturaleza del estudio y en antecedentes bibliográficos que sugieren que la adición de diferentes materiales genera cambios estructurales y mecánicos sustanciales en la matriz cristalina del yeso tipo IV. Los parámetros de entrada para el modelo fueron un nivel de significancia (α) de 0,05 y una potencia estadística mínima ($1-\beta$) de 0,80.

El cálculo arrojó un requerimiento de 10 unidades experimentales por grupo. En consecuencia, se estandarizó un tamaño muestral de $n=10$ para cada grupo (Agua, Polímero 12,5 % y Polímero 25 %), totalizando 30 probetas por cada una de las propiedades evaluadas. Esta cantidad asegura la robustez metodológica necesaria para detectar diferencias estadísticamente significativas en las variables analizadas, manteniendo un equilibrio entre la sensibilidad de la prueba y la viabilidad técnica de la confección de las muestras en laboratorio.

En el esquema siguiente, se muestra la conformación de los grupos y la distribución de las muestras utilizadas para el análisis comparativo de cada una de las propiedades evaluadas.

Esquema N°1: Representa la distribución de las muestras utilizadas para el análisis comparativo de cada una de las propiedades evaluadas.



Propiedades ensayadas

Dureza superficial

Esta prueba mide la resistencia de un material a ser rayado, siendo una medida de la resistencia de un material a la deformación permanente localizada. Está relacionada a la capacidad del material de resistir cargas compresivas. Afecta solo a la superficie de la muestra o modelo y su valor se expresa como Dureza Vickers (*HV*). La ADA, ANSI e ISO no fijan un valor determinado.

Los especímenes, con forma de poliedro tridimensional, rectangulares, de 25 x 12 x 3 mm de altura y de superficies pulidas, se obtuvieron mediante moldes confeccionados, a partir de una lámina de acrílico de 3 mm de espesor, en la que se crearon 12 oquedades de 25 x 12 mm utilizando una cortadora láser CO 2- 40 watts Hubis, Modelo 2030, China.

La imagen del molde puede observarse en la figura N° 2.

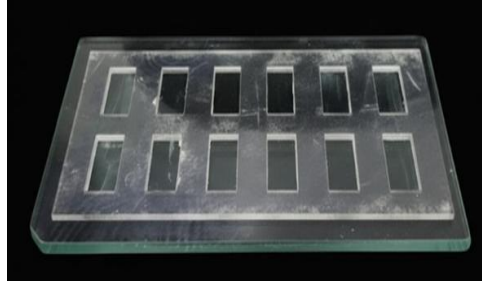


Figura N°2: Matriz de acrílico con las oquedades para realizar probetas de 25x12x3 mm

El molde se ubicó sobre una superficie plana que sirvió de base. Sobre sus paredes y piso, se aplicó una fina capa de vaselina para facilitar el retiro de las probetas luego del fraguado del yeso, el cual se preparó según los estándares fijados en la norma ISO 6873: 2013.

Para la preparación del material, se midieron 23 ml de agua o polímero líquido al 12.5 % o al 25 % y se colocaron en la taza de mezclado. Posteriormente, se incorporaron 100 gramos de polvo de yeso por espolvoreo, permitiendo que el polvo se embeba en el líquido durante aproximadamente 15 segundos. La mezcla se inició en forma manual con una espátula para mezclar yesos hasta incorporar totalmente este polvo al líquido y se continuó mediante espatulado mecánico bajo vacío por 30 segundos a 425 RPM.

La preparación obtenida se vertió en cada oquedad del molde llenando correctamente el espacio, al tiempo que se aplicó vibración al material durante 10 segundos mediante vibradora mecánica para asegurar que fluya, llene el contenedor y facilite la salida del aire ocluido. Al mismo tiempo, se deslizó y presionó ligeramente una placa plana (loseta de vidrio) sobre la masa de yeso para nivelar la superficie y asegurar la uniformidad del espesor de todas las muestras.

Los especímenes de cada grupo se llenaron en forma simultánea. Sesenta minutos después del inicio del fraguado, las muestras fueron cuidadosamente desmoldadas y dispuestas de forma ordenada sobre una superficie plana por 2 horas.

Se confeccionó un número superior al requerido de probetas para el estudio y posteriormente, se realizó un proceso de selección visual para descartar aquellas que presentaran burbujas o defectos visibles. El excedente fue eliminado aleatoriamente hasta dejar 10 especímenes por grupo.

Las probetas seleccionadas fueron identificadas por grupo y enumeradas. A continuación, se almacenaron por separado en recipientes herméticos y fueron conservadas a temperatura (24 °C) y humedad controlada (50 % de humedad relativa). Setenta y dos horas después, fueron pulidas hasta obtener una superficie uniforme, plana, lisa y libre de marcas o imperfecciones. En la figura N°3 A puede visualizarse un grupo de probetas y su control de tamaño utilizando un calibre analógico.



Figura N° 3: Probetas para ensayos Grupo A preparadas con agua bidestilada. B Control de medidas de las probetas mediante calibre analógico 150 mm / 6" - 0.05 mm / 1/128" - 530-104 (Mitutoyo). Nota: probetas realizadas según normativas ISO.

El estudio para determinar la dureza superficial de las muestras se efectuó 7 días después de su confección.

Para el ensayo se utilizó un Microdurómetro *Vickers Future Tech FM300*. Los especímenes se colocaron en la plataforma del aparato y se analizó la resistencia a la penetración en seco mediante la indentación con un penetrador de diamante en forma de pirámide de paredes planas y base cuadrada con un ángulo de 136° .

El análisis se realizó sobre 3 puntos de la probeta, aplicando una carga de 0.200 Kg durante 15 segundos lo que generó una impronta de forma piramidal a la que se le midieron las diagonales mediante microscopio óptico integrado al mismo aparato (Norma ISO 6570/ ASTM E384).

Los pasos realizados para ejecutar la evaluación de dureza Vickers pueden visualizarse en la figura N° 4. En la imagen “A” se aprecia el microdurómetro. En la “B” se muestra el momento de aplicación de fuerza de la pirámide de diamante sobre la probeta. La imagen “C” permite visualizar el momento de lectura mediante el microscopio y, por último, la imagen “D” constituye una imagen microscópica de la huella de las diagonales marcadas durante la experiencia.

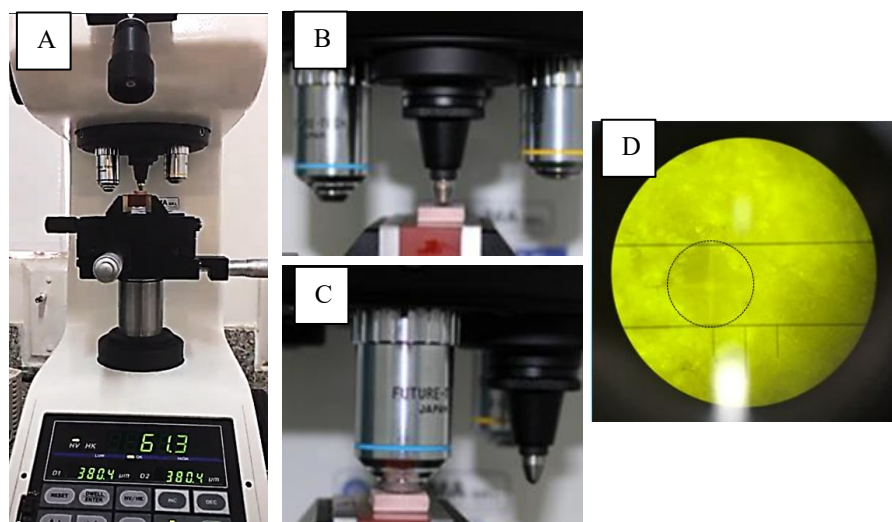


Figura N°4: A Microdurómetro de Vickers, B Indentación, C Medición con Microscopio, D Visualización de diagonales.

Los valores de las tres lecturas se promediaron, obteniendo un número confiable. La expresión final de dureza Vickers, (HV) se calcula a partir de un número constante (1.8544) que constituye un factor de conversión derivado de la inclinación de las caras de la pirámide, (136°) y de la forma de la huella resultante, en relación con la fuerza de ensayo aplicada y la media de las diagonales registrada, utilizando una fórmula matemática:

$$HV = 1,8544 \times \frac{F}{D^2}$$

En ella HV = Dureza Vickers.

1,8544= Factor de conversión

F: Es el valor de la fuerza aplicada (kgf)

D: Es el valor medio de las diagonales calculado: $\frac{d_1+d_2}{2}$

La dureza Vickers se expresa como HV (representado por el valor obtenido al aplicar la fórmula expuesta anteriormente, seguido por el de la fuerza aplicada). En este caso (xx.VH0.2) los valores medios obtenidos del análisis de cada probeta, expuestos en la Tabla N°1, fueron registrados en planilla Excel y tabulados para el posterior análisis de HV de cada uno de los grupos analizados para evaluar su posible diferencia.

Tabla N° 1: Valores promedios registrados en las distintas probetas y grupos a los que pertenecen.

Probeta N°	Dureza superficial	Grupo A: Agua Bidestilada	Grupo B: Polímero 12.5%	Grupo C: Polímero 25%
1	$HV = 1,8544 \times \frac{F}{D^2}$	62,6	84,4	82,4
2		66,6	137,7	123,3
3		63,83	81,1	104,8
4		57,7	111,9	66,3
5		66,4	68,4	130,3
6		103,8	64,5	106,6
7		98,13	99,7	102,9
8		78,86	66,1	61,96
9		72,6	69,7	84,26
10		95,06	68,3	76,6

Valores obtenidos de HV en grupo A, B y C donde: 1,8544 es el numero constante, F: Fuerza aplicada. D²: Longitud de las diagonales al cuadrado.

Expansión lineal de fraguado

La *American Dental Association* (ADA) establece una expansión de fraguado aceptable para los yesos piedra de alta resistencia de 0.00 % a 0.01 %. Por otro lado, las normas ISO determinan que no deben superar 0,15 micrómetros. Para este ensayo se construyó un extensómetro teniendo en cuenta las normativas ISO y dentro de las limitaciones del medio. Se realizó mediante una lámina de acrílico cristal de 4 mm de espesor, conformando una cubeta de corte triangular de 100 mm de extensión, con paredes de 40mm de altura dispuestas en ángulo de 90°, un extremo fijo y otro móvil, el que se colocó en contacto con la aguja de medición de un micrómetro comparador centesimal marca *Wembley* (0-10 mm a 0.01 mm), modelo 6407 Prof. incorporado al instrumento, fijados a una base plástica mediante soportes especiales.

En la figura N°5 se observa el gráfico del extensómetro según ISO y la imagen del aparato realizado.

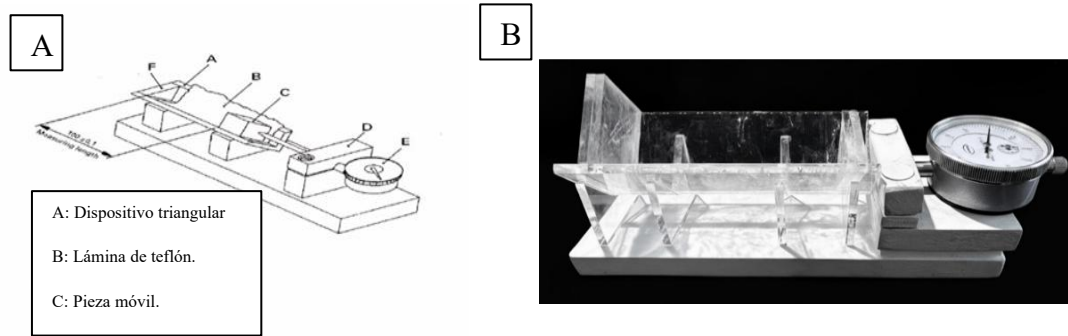


Figura N° 5: A. Gráfico de extensómetro según ISO 6873/2013 y B extensómetro realizado para el ensayo.

Se prepararon y evaluaron individualmente 10 probetas donde el yeso se mezcló con agua bidestilada y 20 probetas con las dos diferentes concentraciones del polímero (10 de cada una). Para la preparación del material, se siguieron las mismas pautas que para el análisis anterior.

Las paredes del instrumento fueron cubiertas mediante una lámina de politetrafluoroetileno (PTFE o teflón), previo al vaciado de cada muestra; el que se realizó dentro de los sesenta segundos posteriores a la preparación del yeso. Realizado el llenado de la cuba, la superficie del material se cubrió mediante otra lámina de PTFE. Se observa en la figura N° 6 A el extensómetro llenado con yeso, cubierto con PTFE; y las imágenes B, C, D, donde se ve la expansión del material en el tiempo: 60, 90 minutos y 24 horas.

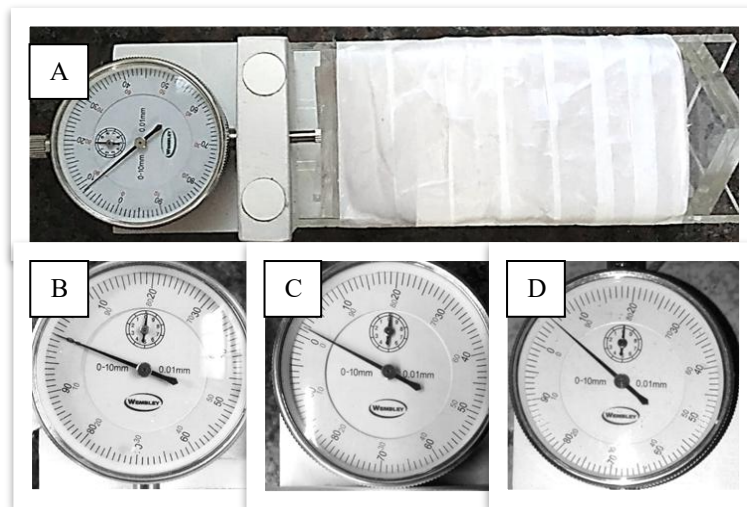


Figura N° 6: A Extensómetro llenado con yeso y cubierto con PTFE o teflón, B, C, D, Evaluación de la expansión en el tiempo: 60, 90 minutos y 24 horas.

Medición: la expansión lineal se leyó a las 24 horas de vaciada la muestra. Los valores fueron registrados y tabulados para su posterior evaluación y se pueden observar en la Tabla N°2:

Tabla N°2: Valores de Expansión lineal de Fraguado en los grupos A, B y C.

Probeta N°	Grupo A: Agua Bidestilada	Grupo B: Polímero 12.5%	Grupo C: Polímero 25%
1	0,05	0,01	0,01
2	0,06	0,05	0,02
3	0,08	0,04	0,01
4	0,09	0,03	0,01
5	0,06	0,03	0,02
6	0,08	0,035	0,02
7	0,07	0,02	0,02
8	0,06	0,03	0,02
9	0,05	0,05	0,03
10	0,03	0,02	0,01

La expansión de fraguado se expresa en % de mm.

Resistencia a la compresión

Para este ensayo, se confeccionaron en una primera instancia probetas cilíndricas de 40 mm de longitud por 20 mm de diámetro, tal como indica la normativa, las que pueden visualizarse en la figura N° 7. Sin embargo, los resultados obtenidos no eran confiables por su alta dispersión. Se decidió entonces, el cambio de tamaño de probeta.



Figura N° 7: A. Se visualizan las probetas que debieron ser descartadas por la dispersión de los valores durante la experiencia.

El tamaño de las probetas se ajustó a un diámetro de 14 mm al igual que su altura, según se puede observar en la figura N° 8.

Se emplearon aros plásticos con un corte longitudinal sellado con cinta adhesiva como moldes, lo que permitió la extracción de las muestras sin comprometer su integridad.

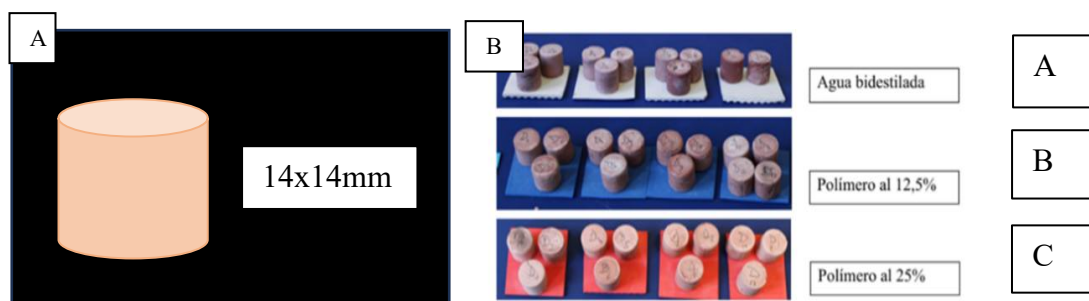


Figura N° 8: A esquema de probetas de reemplazo de 14x14 mm. B, fotografía de las probetas confeccionadas y almacenadas según grupo correspondiente: A, B o C

Para optimizar el desmolde, se aplicó una película de separador de yeso y se posicionaron sobre una loseta de vidrio; posteriormente, el conjunto se colocó en una vibradora durante el llenado para garantizar la compactación adecuada del material.

Para enrasar y alisar la superficie de las muestras, se les colocó otra loseta de vidrio por encima, siguiendo el mismo procedimiento que para los especímenes anteriores.

Se las identificó con un número arábigo (1 a 10) seguido de la letra correspondiente al grupo al que pertenecían y se almacenaron en un recipiente hermético a temperatura y humedad controlada durante un período de siete días.

Previo a su procesado en la máquina de ensayos de materiales fueron suavemente pulidas con el objetivo de obtener superficies planas y uniformes.

Se analizaron 30 especímenes, de los cuales, al igual que para las experiencias anteriores, 10 correspondieron a cada grupo, tal como se visualiza en la figura N°9.

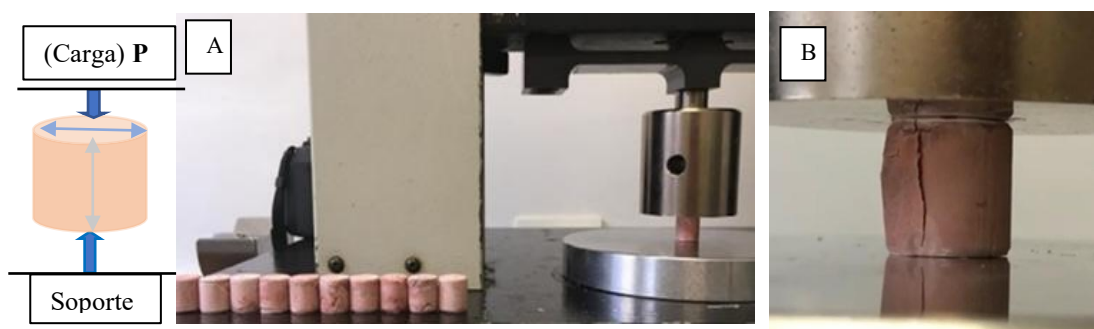


Figura N° 9: Gráfico de aplicación de fuerzas. A ensayo de resistencia compresiva en INSTRON 1110; B momento de fractura de una probeta.

A continuación, se colocó cada probeta en la máquina universal de ensayos con su eje en posición vertical y se aplicó una fuerza de 5 kN a una velocidad

de 1 mm/min. Los valores de fuerza fueron registrados en Newtons (N) y, posteriormente, se calculó la resistencia a la compresión en Megapascales (MPa) dividiendo dicha fuerza por el área de la probeta. Los datos obtenidos se volcaron en una planilla para su análisis y se presentan en la Tabla N° 3:

Tabla N°3: Comparación de valores de dureza compresiva de yeso tipo IV preparado con agua, polímero al 12.5% y al 25%.

Tipo de ensayo	Agua en N	Polímal 12% en N	Polím 25% en N	Sc Agua MPa	Sc Polím 12,5% MPa	Sc Polím 25% MPa
1	5118	4311	1497	33,264	28,019	9,730
2	4082	5118	3896	26,531	33,264	25,322
3	2945	4290	1465	19,141	27,882	9,522
4	5716	3126	1642	37,151	20,317	10,672
5	3238	3241	5118	21,045	21,065	33,264
6	5789	5115	3562	37,625	33,245	23,151
7	2515	2607	2425	16,346	16,944	15,761
8	3397	2462	3673	22,079	16,002	23,872
9	8987	5708	5431	58,410	37,099	35,298
10	2740	1938	5118	17,808	12,596	33,264

Los valores están expresados en N y convertidos a MPa donde: σ = resistencia compresiva; P = carga; π = número pi 3.14; r^2 = radio cuadrado

Resistencia Compresiva Diametral o Resistencia a la tracción (método indirecto)

Los yesos tipo IV deberían presentar una resistencia a la tracción húmeda de 2.3 MPa que se duplica cuando se secan, por lo cual se evalúa a los siete días, habiendo mantenido las muestras almacenadas bajo condiciones estables de temperatura en 24 °C y humedad relativa del 50 %.

Los especímenes utilizados en este ensayo se confeccionaron bajo las mismas pautas que las empleadas al evaluar resistencia a la compresión.

Se analizaron 30 especímenes.

Con la máquina universal de ensayos se aplicó una carga (P) compresiva diametral, perpendicular al eje longitudinal hasta producir la fractura de la muestra lo que induce una tensión de tracción (método indirecto de medición). El procedimiento se puede visualizar en la figura N° 10.

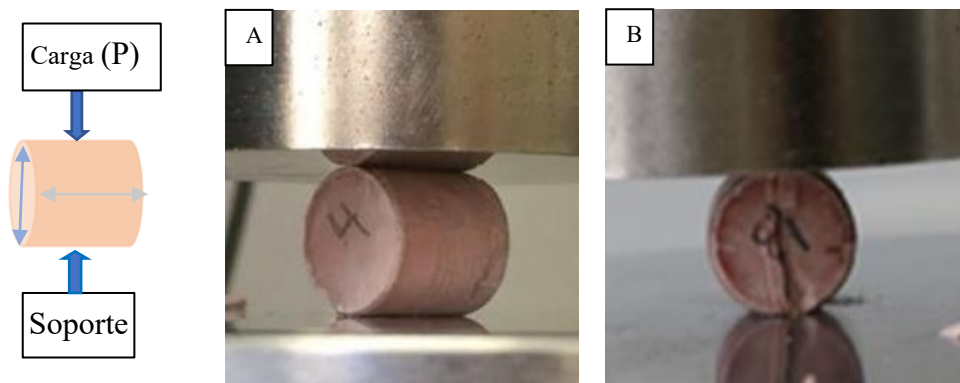


Figura N°10: Gráfico de aplicación de las Fuerzas. Especímen posicionado en máquina de ensayos INSTRON 1110.

Para calcular el resultado, se aplicó la fórmula:

$$\text{Resistencia compresiva diametral: } S_t = \frac{2 \times P_{max}}{\pi \times t \times d}$$

Al igual que en el análisis de resistencia compresiva, se aplicó una fuerza de 5 kN a una velocidad de 1 mm/min. Los valores registrados en N por la máquina universal de Ensayos se volcaron en una planilla y se convirtieron a MPa para expresar la presión requerida para producir la fractura, según se puede visualizar en la Tabla N°4:

Tabla N° 4: Comparación de valores de dureza compresiva diametral de yeso tipo IV preparado con agua, polímero al 12.5% y al 25%.

Tipo de ensayo	Agua en N	Polímero al 12% en N	Polímero al 25% en N	Agua en MPa	Polim12,5%MPa	Polím 25%MPa
1	1282	1556	1808	4,166	5,057	5,875
2	2047	3137	1542	6,652	10,194	5,011
3	3015	1565	1591	9,798	5,086	5,170
4	1226	1143	1150	3,984	3,714	3,737
5	$S_t = \frac{2 \times P_{max}}{\pi \times t \times d}$	1042	1161	3,006	3,386	3,773
6	1197	1607	1095	3,890	5,222	3,558
7	1245	1423	1287	4,046	4,624	4,182
8	1106	768,7	1448	3,594	2,498	4,706
9	1672	747,5	960	5,434	2,429	3,120
10	1672	805	1351	5,434	2,616	4,390

Los valores, expresados en N por la máquina de ensayos, son convertidos a MPa. donde S_t = Resistencia compresiva diametral; P=carga; π = número pi 3,14; d = diámetro; t = Espesor

Se observó que al realizar el ensayo de resistencia compresiva los trazos de fractura en las probetas preparadas con agua bidestilada y polímero eran similares. En contrapartida, al realizar el ensayo de resistencia a la tracción, las piezas preparadas con el polímero tenían una fractura más brusca.

Resistencia a la flexión

Para realizar este ensayo, el número de muestras y el procedimiento de preparación fueron los mismos que para las experiencias anteriores.

El formato y tamaño de las probetas reprodujo el del análisis de dureza superficial. Se corroboraron las medidas de cada probeta con un calibre analógico - 530-104 - Mitutoyo.

El almacenamiento de los especímenes se realizó por siete días a partir de su obtención.

La medición se basó en someter el material a una carga de flexión controlada.

El ensayo de fractura del material se realizó colocando cada probeta sobre una base con dos apoyos situados a 20 mm de distancia entre sí y aplicando una carga de 5 kN a una velocidad de 1 mm/min con la máquina de ensayos de materiales tal como se observa en la figura N° 11. Los valores generados, registrados en kN/min fueron convertidos a MPa.

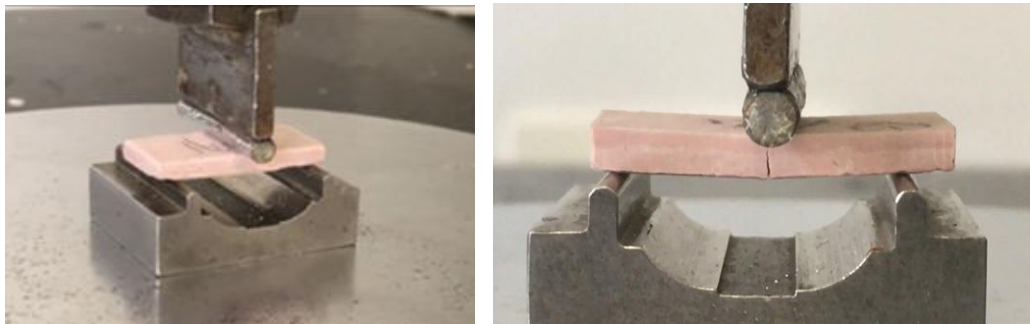


Figura N° 11: Aplicación de carga de 5 kN con INSTRON 1110 a una velocidad de 1 mm/min. Obsérvese la probeta al momento de la fractura.

La resistencia a la fractura de los modelos de yeso varía significativamente en función del tiempo transcurrido desde el fraguado. La prueba se realizó a siete (7) días de preparadas las muestras y no se observaron diferencias entre los grupos.

Los valores obtenidos por la máquina universal de ensayos se expresaron en una planilla de Excel y se convirtieron a MPa de forma tal de recabar la información, expresada en la Tabla N°5:

Tabla N° 5: Comparación de valores de resistencia a la fractura de yeso tipo IV preparado con agua, polímero al 12.5 % y al 25 %.

Tipo de ensayo	Agua en N	Polímero al 12% en N	Polímero al 25% en N	Agua en MPa	Polim 12,5%MPa	Polím 25% MPa
1	86,15	66,6	47,95	23,931	18,500	13,319
2	73,1	57,7	50,6	20,306	16,028	14,056
3	64,1	36,05	42,1	17,806	10,014	11,694
4	65,4	33,15	54,25	18,167	9,208	15,069
5	61,65	33,3	47,15	17,125	9,250	13,097
6	97,7	38,4	58,4	27,139	10,667	16,222
7	67,15	49,15	63,7	18,653	13,653	17,694
8	66,05	67,9	33,95	18,347	18,861	9,431
9	85,5	50,65	71,8	23,750	14,069	19,944
10	64,1	39,15	52,45	17,806	10,875	14,569

Los valores están expresados en kN y convertidos a MPa donde: σ = resistencia flexural; 3. F= Fuerza; L= longitud de apoyos; 2. b = ancho de la probeta; d = espesor de la probeta al cuadrado.

Reproducción de detalle

Para este ensayo, se utilizó una loseta fabricada en acero inoxidable altamente pulido para asegurar precisión en la lectura de una serie de líneas paralelas, grabadas en su superficie. La más fina de 0,025 mm (25 μ m), mientras que las otras son de 50 μ m y 75 μ m de espesor, se entrecruzan con dos líneas perpendiculares. Tiene forma cuadrada y se encuentra en el Laboratorio de Biomateriales de la Universidad de Buenos Aires (UBA). En la figura N° 12 se la puede observar, junto a un esquema de la profundidad y forma de las ranuras grabadas en ella.

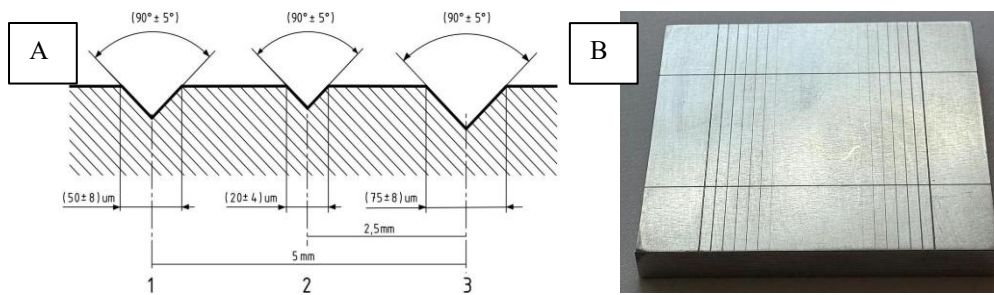


Figura N° 12: A. Gráfico de ancho de líneas de la loseta; B. Loseta metálica.

Para la realización de las probetas de ensayo, se elaboraron cubetas de tamaño y forma adecuada mediante una placa de acrílico fotocurable para contener el material para impresiones, a la que se le aplicó una delgada película de adhesivo específico, el cual se dejó secar por un mínimo de 15 minutos antes de cargar el material. Durante la toma de impresión, una vez centrada la cubeta que contenía silicona de fraguado por adición (Panasil) se le aplicó una carga de 1500 g sobre toda su extensión por un lapso de 5 segundos, tal como indica la norma ISO correspondiente y luego se mantuvo en posición, libre de carga por cinco minutos hasta el completo fraguado del material.

Las probetas fueron confeccionadas siguiendo el protocolo planteado para las distintas experiencias. En la figura N° 13 se observa la impresión de la loseta con silicona marca Panasil y la posterior confección de la probeta de yeso.

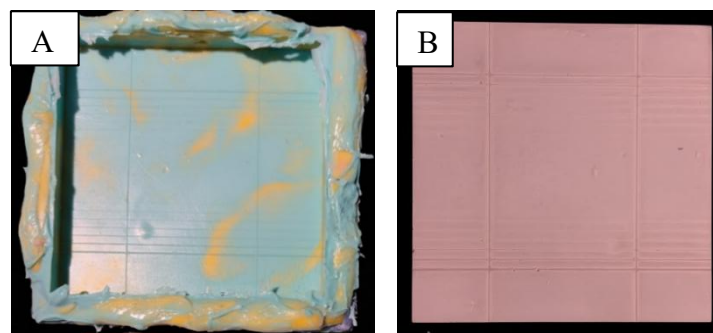


Figura N° 13: A Impresión de silicona por adición, B Llenado de las impresiones con yeso.

Una vez realizadas, se las mantuvo sobre una superficie plana por 30 minutos y luego se las almacenó en un recipiente a temperatura ambiente durante siete días, momento en el cual se realizó la lectura correspondiente.

La capacidad de reproducción de detalles se analizó mediante una lupa estereoscópica marca Lancet que se encuentra en el Centro de Investigaciones Odontológicas de la Facultad de Odontología UNCUYO (CIO), bajo magnificación de 10X para determinar la línea más fina reproducida de manera clara y continua en toda su longitud.

Se utilizó un ocular grillado que incorpora una escala grabada para realizar mediciones directas sobre la imagen. Se considera satisfactorio si dos de los tres anchos de líneas horizontales son reproducidos.

Según se puede visualizar en la figura N° 14 la totalidad de los especímenes que conformaron los tres grupos reprodujeron los detalles presentes en el modelo maestro.

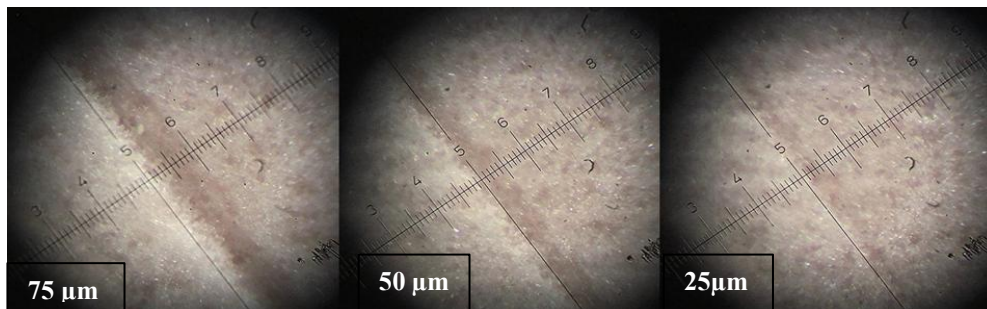


Figura N°14: detalle de las ranuras reproducidas de 75 μm , 50 μm y 25 μm en lupa estereoscópica.

Las Normas ISO requieren que estos materiales posean una capacidad de copia de detalles de 50 micrones (0,05 mm).

Resistencia al desgaste

Los especímenes (N=30) para realizar esta experiencia, se obtuvieron a partir de un modelo maestro con forma de prisma de base rectangular de 50x50 mm y 4 mm de altura; en su cara superior presenta crestas verticales de 1 mm de altura, de paredes laterales inclinadas a 45° de angulación simulando segmentos de márgenes coronarios, obtenido por diseño asistido por computadora y generado por impresión 3D utilizando resinas W&PDental (Germany). Obsérvese en la figura N°15 el modelo y la impresora 3D:

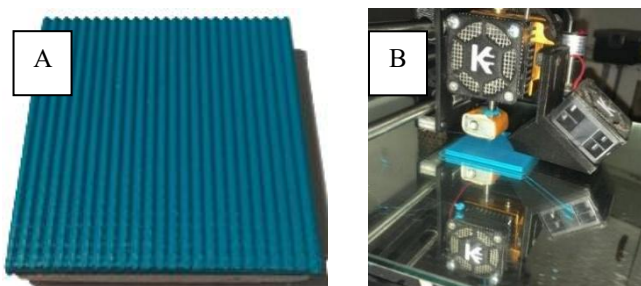


Figura N° 15: A. Modelo maestro realizado en impresora 3D y B impresora láser reproduciendo una superficie con relieves de 1 mm de altura.

Las probetas de yeso de 50 mm de largo por 50 mm de ancho y 4 mm de altura se lograron impresionando la matriz con silicona por adición (Panasil), para cuya contención se confeccionaron cubetas de acrílico de tamaño y forma adecuados mediante una placa fotopolimerizable a la que se le aplicó adhesivo específico de igual forma que para la experiencia anterior.

La toma de impresión se realizó utilizando una carga inicial de 1500 g durante 5 segundos luego de centrar la cubeta, la cual luego se mantuvo en posición libre de carga, hasta la completa vulcanización del material.

Posteriormente, se realizaron los vaciados con el yeso en sus tres preparaciones diferentes.

Las imágenes representativas de una impresión y de la probeta obtenida se pueden observar en la figura N° 16.

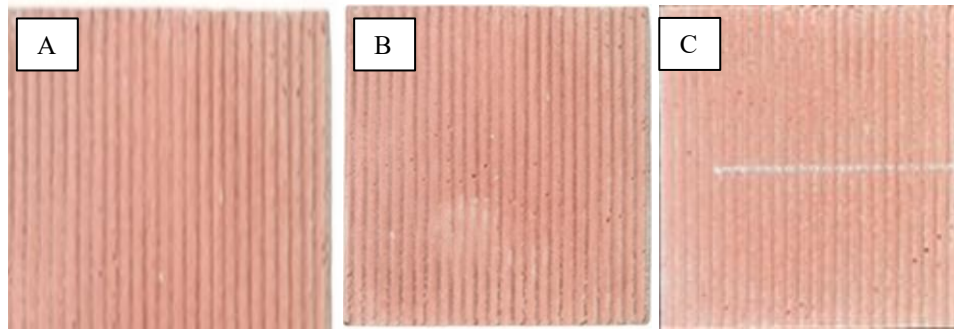


Figura N° 16: A impresión de la matriz y posterior obtención de las probetas, B previo y C luego de sufrir el desgaste.

La mezcla y preparación del yeso se realizaron tal como lo sugiere la normativa y fue previamente explicada, vibrando cada probeta y manteniéndola en el molde hasta su fraguado. Luego, se retiraron cuidadosamente y se las almacenó por 7 (siete) días bajo condiciones de temperatura y humedad controladas.

La experiencia se realizó en el Laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ingeniería, UNCUYO.

Para este ensayo, se construyó un dispositivo *ad hoc* utilizando una base o mesa de soporte y sobre ella, por una parte, se fijó un motor con capacidad de rotación de 5 RPM al que se le anexó un sistema de biela/manivela para movilizar linealmente una platina a la que se fijaron los especímenes de prueba. Por otra parte, se colocó un brazo fijo en cuyo extremo se instaló un vástago metálico cilíndrico de 6 mm de diámetro terminado en una punta cónica, cuyo peso se ajustó en 20 g mediante una pesa especial, sostenido por un soporte perpendicular a la base, que permite su desplazamiento vertical de manera de mantener contacto permanente sobre las probetas de

ensayo fijadas a la platina móvil durante el ciclado de desgaste. Ver figura N° 17 A y B.

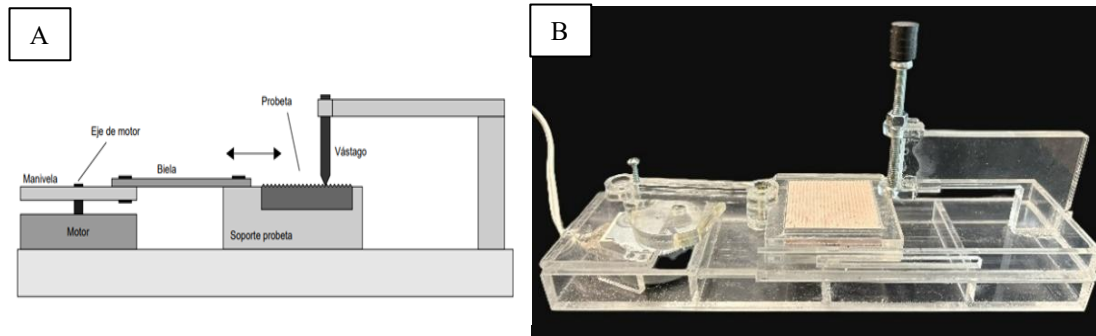


Figura N°17. A Se observa un corte vertical, esquemático, donde se muestran todos los componentes del aparato de desgaste utilizado. B Se observa el aparato de desgaste en funcionamiento.

Las muestras se sometieron a un desplazamiento lineal de 40 movimientos de ida y vuelta, a razón de 5 RPM (8 minutos), producidos por el motor de 220 volts, 50/60 Hz y 4 W de potencia (Synchronous, modelo 49TYZ- A2, China), los que se controlaron mediante un temporizador digital a través de un teléfono iPhone 16. Los elementos utilizados, pueden observarse en la figura N° 18: A- B - C y D.

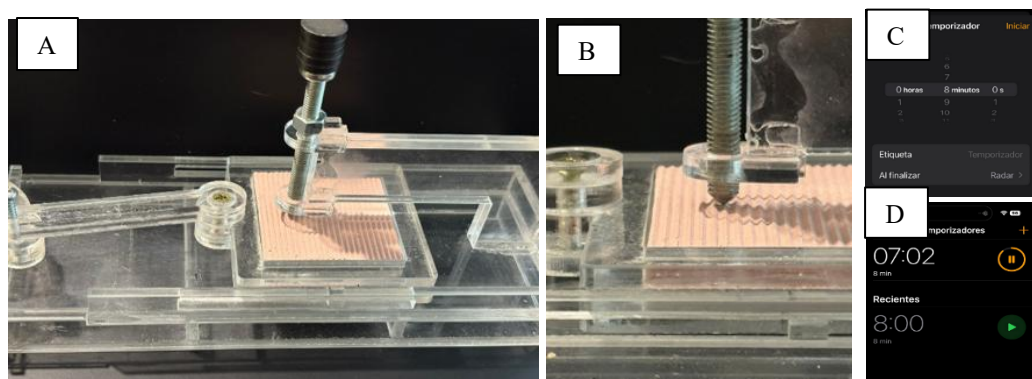


Figura N° 18 A y B muestran el aparato de desgaste en funcionamiento. C y D, permiten visualizar el uso de un temporizador digital para controlar con exactitud el tiempo de trabajo.

El extremo agudo del vástago del aparato, al contactar sobre las muestras en movimiento, esculpió un surco por desgaste de material el que se puede visualizar en la figura N° 19.

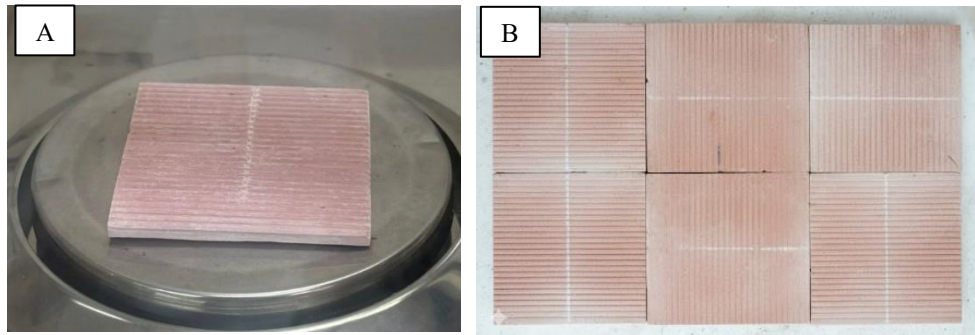


Figura N° 19: Probetas ensayadas donde se observan las huellas del desgaste.

Los especímenes analizados fueron pesados antes y después de ser sometidos a desgaste. Se utilizó una balanza analítica de alta precisión marca A&D, modelo HR200, número de serie 12205644, de origen japonés, previamente calibrada con un rango de pesaje de 0.0001 g hasta 300 g. Las imágenes se pueden observar en la figura N° 20.

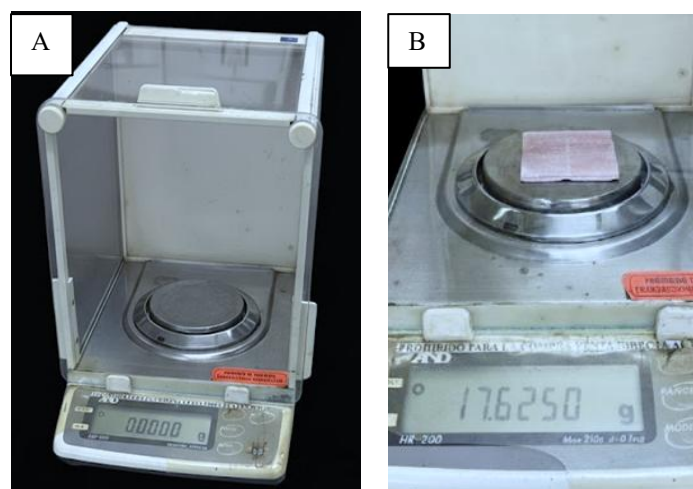


Figura N° 20: A Balanza analítica; B Probeta colocada en la balanza para su pesaje.

Para el análisis comparativo entre los grupos, se determinó la pérdida de masa de cada muestra y se estimó el desgaste porcentual mediante porcentaje, tal como se demuestra en la Tabla N° 6 y aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de desgaste: } \left(\frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \right) \times 100$$

Tabla N° 6: Comparación de valores iniciales y luego de un ciclo de degaste de un yeso tipo IV preparado con agua, polímero al 12.5 % y 25 %.

Pro-beta	Agua destilada			Polímero 12.5%			Polímero 25%		
	Peso inicial	Peso final	Des-gaste %	Peso inicial	Peso final	Des-gaste %	Peso inicial	Peso final	Des-gaste%
1	17,093	17,0564	0,216	19,5203	19,4745	0,2346	13,4763	13,4736	0,02
2	17,6473	17,5868	0,342	20,8233	20,8211	0,0108	18,3638	18,3622	0,008
3	14,95	14,901	0,327	16,8744	16,8467	0,164	18,1015	18,0991	0,013
4	18,1426	18,076	0,367	18,1421	18,1056	0,216	16,7003	16,6962	0,024
5	20,4674	20,4007	0,325	16,1533	16,1239	0,182	17,4281	17,4232	0,028
6	17,5493	17,5085	0,232	16,2301	16,2189	0,069	20,1014	20,0975	0,019
7	15,8437	15,8128	0,195	15,6593	15,6501	0,058	20,7592	20,7562	0,013
8	17,0881	17,0563	0,186	17,9596	17,9576	0,011	13,4763	15,3365	0,029
9	17,9126	17,8639	0,271	18,625	18,619	0,0322	18,3638	15,9449	0,01
10	17,093	17,0564	0,233	17,0302	17,0231	0,04	18,1015	14,5158	0,017

Nota: Los pesos iniciales y finales de las probetas se expresan en gramos y el grado de desgaste, en porcentaje.

Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos desarrollados en las Tablas N°1 a 6 fueron procesados estadísticamente.

Análisis estadístico

Este estudio se basó en un diseño experimental unifactorial aleatorizado. Los datos obtenidos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey para identificar diferencias significativas ($P < 0.05$) entre el grupo control y los grupos modificados.

Dureza superficial

El grupo A, en el que el yeso se mezcló con agua bidestilada dio como resultado una media de 75,51 HV0.2. El grupo B donde se utilizó polímero al 12,5 %, mostró una dureza de 81,2 HV0.2 kgf y el grupo C (polímero al 25 %) de 93,4 HV0.2 kgf.

La adición de plásticos determinó un incremento en los valores de la dureza.

El análisis comparativo entre grupos estudiados, mediante prueba Anova, al haber establecido un índice de confianza de ($P < 0.05$), evidenció que los cambios no son significativos ($P = 0.11$). Los datos se expresan en la Tabla N°7.

Tabla N° 7: Comparación de valores de dureza superficial de yeso tipo IV, mezclado con agua, polímero al 12.5 % y al 25 %.

Propiedad	Grupo	Media arit	Desv.Est.	Mín.	Máx.	P (α)
Dureza HV	Agua (A)	75,51	14,04	62,6	98,13	
Dureza HV	Polim. 12,5% (B)	81,2	16,84	66,1	111,9	0,11
Dureza HV	Polim. 25% (C)	93,4	18,93	66,3	123,3	

Resultado luego de realizar prueba ANOVA. $P = 0.11$.

Los datos de la Tabla N° 7 se expresan en la siguiente figura:

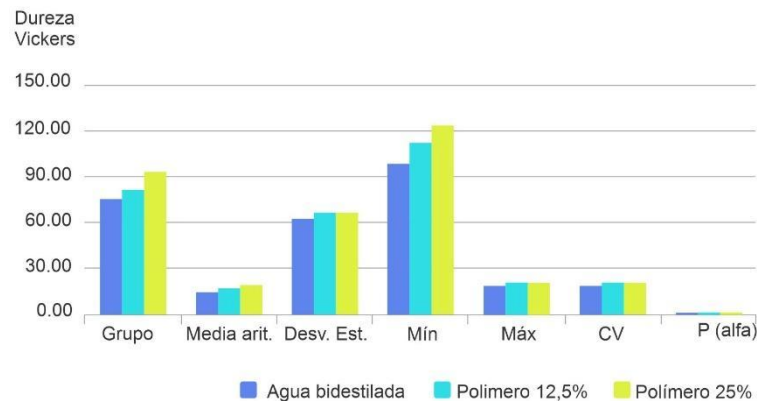


Figura N° 21: representación de los valores de la dureza superficial en las tres diferentes composiciones

Expansión de fraguado

El análisis de la expansión de fraguado reveló una reducción inversamente proporcional a la concentración de polímero estireno añadida. Mientras que el grupo control (Grupo A: agua destilada) presentó una expansión media del 0,06 %, el uso de polímero al 12,5 % y 25 % redujo estos valores a 0,03 % y 0,02 %, respectivamente.

A diferencia de la dureza superficial, el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey confirmaron la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tres grupos estudiados ($P < 0,01$). Estos resultados sugieren que la incorporación de polímero estireno es una variable determinante para mejorar la estabilidad dimensional de los yesos tipo IV.

Los datos descriptivos y los niveles de significancia se detallan en la Tabla N° 8.

Tabla N° 8: Comparación de los valores de expansión de fraguado de un yeso tipo IV con agua y según concentración de polímero.

Propiedad	Grupo	Media arit.	Desv.Est.	Mín.	Máx.	P (α)
Exp. frag (%)	Agua (A)	0,06	0,01	0,05	0,08	
Exp. frag (%)	Polím. 12.5% B)	0,03	0,01	0,02	0,05	<0.01
Exp. frag (%)	Polím.25%(C)	0,02	0,01	0,01	0,02	

Los valores se expresan en forma de %. Se aplicó prueba de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación múltiple (Tukey) para establecer diferencias entre los grupos. ($P < 0.01$).

La marcada tendencia a la baja en la expansión de fraguado se puede visualizar gráficamente en la Figura N° 22.

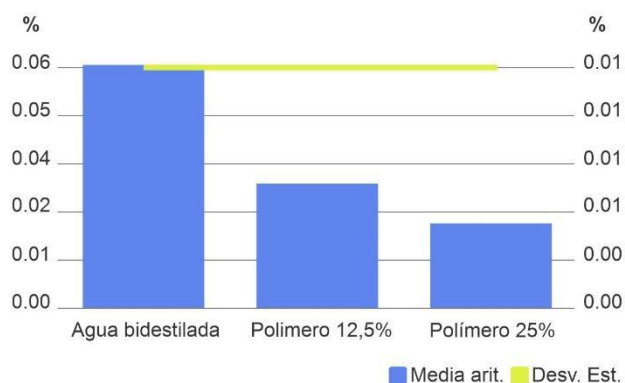


Figura N° 22: variación de la expansión de fraguado (%) en función de la concentración de polímero estireno.

Resistencia compresiva

Los valores medios de resistencia para las muestras del Grupo A (agua bidestilada) fueron superiores a los de ambos grupos experimentales, alcanzando una media de 28,44 MPa. Se observó una disminución progresiva de la resistencia a medida que aumentó la concentración de polímero en la

mezcla. Sin embargo, estas diferencias no poseen significancia estadística ($P = 0,35$).

Este comportamiento sugiere que la adición de polímero no altera la resistencia mecánica del material. Los datos descriptivos de cada grupo se detallan en la Tabla N° 9.

Tabla N° 9: Se comparan los valores de Resistencia compresiva de un yeso tipo IV mezclado con agua, polímero al 12,5 % y al 25 %.

Propiedad	Grupo	Media arit	Desv.Es	Mín.	Max.	CV	P(α)
Resistencia compresiva (MPa)	Agua (A)	28,440	13,012	16,346	58,410	45%	P=0,35
	Polim.12,5%(B)	24,643	8,406	12,596	37,099	34,1%	
	Polim.25%(C)	21,986	10,110	9,522	35,298	46%	

Los valores se expresaron en MPa. La prueba de varianza, ANOVA, no mostró diferencias entre los grupos ($P=0.35$).

Resistencia a la tracción o compresiva diametral (método indirecto)

El análisis de la resistencia a la compresión diametral no mostró variaciones estadísticamente significativas entre los grupos evaluados ($P=0,64$). El Grupo A presentó valores que no fueron superados de forma constante por las mezclas aditivadas con polímero. El Grupo B (polímero al 12,5 %) exhibió una elevada dispersión en los resultados de las muestras, lo que indica una menor reproducibilidad en esta concentración. Por el contrario, el Grupo C (polímero al 25 %) mostró valores más homogéneos y una desviación estándar reducida, sugiriendo que una mayor concentración de polímero favorece la estabilidad del comportamiento frente a la tracción, aunque sin incrementar la resistencia final.

Los resultados descriptivos se presentan en la Tabla N° 10.

Tabla N° 10: Se comparan los valores de Resistencia a la tracción de un yeso tipo IV mezclados con agua, polímero al 12,5% y al 25%.

Propiedad	Grupo	Media arit	Desv. Est.	Mín.	Max.	CV	P(α)
Res. Trac (MPa)	Agua (A)	5,00	1,999	3,006	9,79	40,0	0,64
	Polim 12,5%(B)	4,48	2,293	2,42	10,19	51,1	
	Polim25% (C)	4,35	0,846	3,12	5,78	19,4	

Los valores se expresaron en MPa. La prueba de varianza, ANOVA, no mostró diferencias entre los grupos (P=0,64).

Resistencia a la flexión

Se observó una reducción sustancial en los valores de resistencia a la flexión tras la incorporación de polímero en la mezcla de yeso tipo IV. El grupo control (Grupo A) alcanzó una media de 20,30 MPa, mientras que los grupos experimentales B (12,5 %) y C (25 %) descendieron a 13,11 MPa y 14,51 MPa, respectivamente.

El análisis de varianza (ANOVA) reportó diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,01$), confirmando que la adición del polímero afecta negativamente esta propiedad mecánica. No obstante, dicha afectación no presentó una relación lineal con la concentración del aditivo, sugiriendo que el impacto principal ocurre desde la primera dosificación.

Desde una perspectiva microestructural, este fenómeno se atribuye probablemente a una alteración en la cristalización del yeso, lo que generaría una matriz más heterogénea y frágil ante cargas de flexión. Los valores comparativos detallados, incluyendo desviaciones y rangos, se presentan en la Tabla N° 11.

Tabla N° 11: Se comparan los valores de resistencia flexural de un yeso tipo IV mezclado con agua polímero al 12.5 % y al 25 %.

Propiedad	Grupo	Media arit	Desv.Est.	Mín.	Max.	CV	P(α)
Res.Flex. (MPa)	Agua (A)	20,30	3,42	17,12	27,13	16,9	<0,01
	Polim.12,5% (B)	13,11	3,68	9,20	18,86	28,1	
	Polim.25% (C)	14,51	2,98	9,43	19,94	20,5	

Los valores se expresan en MPa. El valor de $P < 0.01$.

Reproducción de detalles

La capacidad de reproducción de detalles se considera satisfactoria cuando al menos dos de las tres líneas horizontales evaluadas son reproducidas de forma clara, nítida y continua en la totalidad de las réplicas (66,7 %).

Tras el análisis de las muestras, se observó una fidelidad de copia del 100 % en todas las probetas evaluadas, independientemente del agente de mezcla utilizado (Grupo A, B o C). Esta integridad en la transferencia del detalle se mantuvo constante en los tres espesores evaluados (25 μm , 50 μm y 75 μm), lo que demuestra que la incorporación del polímero no altera la fluidez ni la capacidad del yeso tipo IV para registrar microtexturas superficiales.

Resistencia al desgaste

La resistencia al desgaste fue la propiedad mecánica que exhibió la variación más pronunciada entre los grupos evaluados. El grupo control (Grupo A) presentó el mayor índice de desgaste con un promedio del 0,26 %. En contraste, la incorporación de polímero estireno-acrílico logró una reducción drástica de este valor, registrando un 0,10 % para el Grupo B (12,5 %) y un 0,02 % para el Grupo C (25 %).

El análisis estadístico comparativo reveló una diferencia altamente significativa ($P < 0,0001$). Estos resultados, detallados en la Tabla N° 12, confirman que el aditivo mejora sustancialmente la integridad superficial del material. Este fenómeno se atribuye probablemente a una disminución de la porosidad superficial y a una mayor cohesión en la interfaz de los cristales de dihidrato, lo que genera una estructura más resiliente a la abrasión.

Tabla N° 12: Comparación del porcentaje de desgaste de yeso tipo IV según la concentración de polímero

Propiedad	Grupo	Media arit	Desv.Est.	Mín.	Máx.	P (α)
Res. al desgaste (%)	Agua (A)	0,26	0,07	0,16	0,37	
Res. al desgaste (%)	Polim 12,5 % (B)	0,10	0,08	0,01	0,23	<0,0001
Res. al desgaste (%)	Polim 25 %(C)	0,02	0,01	0,01	0,03	

Los resultados fueron expresados en %. La diferencia entre los grupos fue de $P < 0,001$.

La notable eficacia del polímero para mitigar el desgaste superficial, mostrando una relación directamente proporcional entre la concentración y la protección del material, se ilustra en la figura N° 23.

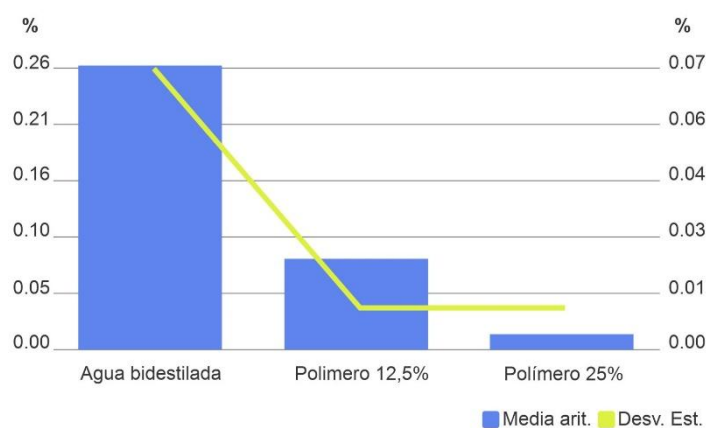


Figura N° 23: Porcentaje de desgaste superficial en función de la composición de la mezcla.

Como síntesis de los resultados antes expuestos, se pueden visualizar en la Tabla N°13 los valores obtenidos en los ensayos de cada propiedad con la tendencia del polímero y su significancia estadística.

Tabla N° 13: Cuadro de síntesis de las propiedades ensayadas en los tres grupos (A, B y C), la influencia del polímero y su significancia estadística.

Propiedad evaluada	Agua bidestilada (A)	Polimero 12,5% (B)	Polimero 25% (C)	Tendencia general del efecto del polímero	Significancia estadística (ANOVA/Tukey)
1. Dureza superficial (HV0.2)	75,51	81,2	93,4	Incremento progresivo con la concentración del polímero	No significativa (P = 0.11)
2. Expansión de fraguado (%)	0,06%	0,03%	0,02%	Reducción marcada de la expansión de fraguado	Altamente significativa (P < 0.01)
3. Resistencia compresiva (Mpa)	28,44	24,64	21,99	Disminuye con la presencia del polímero	No significativa (P = 0.35)
4. Resistencia traccional diametral (Mpa)	5	4,48	4,35	Leve disminución; mayor variabilidad al 12,5%	No significativa (P = 0.64)
5. Resistencia flexural (Mpa)	20,3	13,11	14,51	Disminución clara con el uso del polímero (Sin relación lineal con la concentración)	Significativa (P < 0.01)
6. Reproducción de detalles	100% de reproducción (25-75 um)	100%	100%	No afectada por el polímero	Sin diferencias (cumple ISO en todos los grupos)
7. Resistencia al desgaste (%)	0,26	0,1	0,02	Mejora exponencial de la resistencia al desgaste con el polímero	Altamente significativa (P < 0.0001)

Esta tabla resume los valores obtenidos, la tendencia y su significancia.

Así mismo, podemos observar en la Tabla N°14, los resultados estadísticos en relación con el diseño experimental.

N° 14: Cuadro de síntesis de resultados y potencia estadística del diseño experimental

Propiedad Evaluada	Tendencia con Polímero	Significación (P)	Magnitud del Efecto (f)	Interpretación (Cohen)
Resistencia al desgaste	Incremento masivo	P<0,0001	2,25	Extremo
Expansión de fraguado	Reducción significativa	P<0,01	1,7	Muy Grande
Resistencia a la flexión	Reducción significativa	P<0,01	1,05	Grande
Dureza superficial	Incremento leve	P=0,11	0,45	Grande
Res. compresiva	Reducción leve	P=0,35	0,25	Medio
Res. tracción	Sin cambios claros	P=0,64	0,18	Pequeño
Repro. de detalles	Fidelidad del 100%	N/A	N/A	Óptimo

Esta tabla resume el comportamiento del material y justifica el tamaño muestral (n=10) mediante la magnitud del efecto observado.

DISCUSIÓN

Los yesos dentales, en sus distintas presentaciones, constituyen uno de los materiales de mayor uso en odontología.

La obtención de modelos físicos para la elaboración de distintos aparatos dentales requiere de insumos que aseguren fidelidad en la reproducción de detalles, estabilidad dimensional y una dureza superficial que evite el desgaste o rotura durante su manipulación en el laboratorio, lo que adiciona la necesidad de que posean resistencia a la fractura.

La regulación de estas características está determinada a nivel internacional por los estándares de *ADA*, *ANSI* e *ISO*^{9,11,62}.

En el presente estudio, se evaluó la incidencia de un polímero estireno acrílico de base acuosa incorporado a un yeso tipo IV.

En primer lugar, se analizó la dureza superficial. Un yeso tipo IV fue preparado con agua destilada y soluciones con distinta concentración (12,5 % y 25 %) de un polímero estireno acrílico de base acuosa y luego se analizó la incidencia de estas variables sobre sus propiedades.

Los resultados dentro de las limitaciones de este trabajo muestran que la incorporación de estos polímeros puede modificar las propiedades físicas y mecánicas del material.

Dado que la dureza superficial es clave con respecto a la resistencia a la abrasión y la integridad de bordes finos o rayaduras en la superficie, su

optimización resulta relevante para preservar la fidelidad de los detalles y su integridad morfológica y dimensional^{11,69,71}.

Al emplear soluciones de polímero estireno, se observa un incremento de la dureza Vickers en relación con una preparación convencional con agua destilada, mejora que está directamente vinculada a la concentración porcentual de las soluciones. No obstante, no se alcanzaron conclusiones definitivas al no hallarse una diferencia estadísticamente significativa ($P=0.11$). Esto sugiere la necesidad de realizar nuevas experiencias empleando mayores concentraciones del producto, hasta alcanzar niveles relevantes que no afecten negativamente otras propiedades del material.

La mayor dureza superficial registrada al utilizar polímero estireno durante la mezcla podría estar relacionada con un incremento en la densidad del material como resultado de la infiltración por el polímero en los espacios intercristalinos del yeso, reduciendo su microporosidad y generando un refuerzo matricial para incrementar su capacidad para resistir la indentación al realizar el análisis, generada por la pirámide de diamante.

Si bien diversos autores coinciden con este criterio, en la mayoría de los antecedentes la adición de compuestos fue posterior al fraguado y no durante la mezcla, como se realizó en esta investigación^{11,31,60, 63-67, 69}.

En este contexto, la industria dental, tratando de mejorar sus propiedades, ha incorporado distintos elementos como nanopartículas de anhídrita, resinas epóxicas, goma arábica, metilmetacrilato, sílice coloidal y otros compuestos a productos a base de yeso que, en mayor o menor medida, generan modificaciones en sus propiedades^{29,30,32,42,44}.

La evidencia científica valida estas estrategias para mejorar la calidad requerida según su uso^{31,46,72-75}.

Recientemente, se ha observado que la incorporación de nanopartículas de relleno reduce los espacios intercrystalinos, resultando en superficies más densas y lisas⁴².

En este estudio, el análisis de dureza superficial mediante microdurómetro para determinación Vickers arrojó valores de 75,5HV0.2 para el grupo A, 81,2HV0.2 para el grupo B y 93,4HV0.2 para el grupo C, los cuales resultan compatibles con los reportados en la literatura^{22,50,73,75}.

Al contrastar estos datos con la literatura, se evidencia que Aghbolaghi et al. reportaron valores de 55,85 HV en su grupo control, los cuales ascendieron a 84,52 HV tras incorporar un 2 % de nanopartículas de sílice (SiO₂). Los autores destacaron que este porcentaje representa el umbral mínimo necesario para obtener un incremento significativo⁵⁰.

Por otro lado, distintas publicaciones relacionan alteraciones en la dureza superficial con modificaciones en el manejo de los yesos durante su preparación. Aljafery et al. evaluaron el efecto de la vibración ultrasónica en el vaciado obteniendo una dureza de 49,32 HV frente a los 48,63 HV de la vibración convencional^{22,76}.

La variedad de productos evaluados en los trabajos señalados permite considerar que sería valioso realizar estudios comparativos entre varias formulaciones de yesos tipo IV preparados utilizando soluciones de estireno acrílico para establecer si el comportamiento es similar en los distintos casos.

No obstante, debido a la heterogeneidad en las dimensiones y volúmenes de las probetas, así como a la diversidad de métodos de ensayo (Knoop, Vickers, Brinell o Rockwell) y las variables introducidas durante la preparación, los resultados no son plenamente comparables. Por ello, resulta pertinente considerar, en consonancia con otros autores, que la metodología para determinar esta propiedad requiere aún de una mayor estandarización^{11,22,76,20,31,77,62,72}.

En este trabajo, las condiciones de manipulación del yeso no fueron modificadas respecto a las instrucciones de su fabricante, excepto el uso de un polímero estireno acrílico para la mezcla como variable dependiente.

Otro estudio concluye que el vibrado durante el proceso de vaciado de un molde reportó durezas superiores cuando se aplicó vibración ultrasónica como variable, respecto a vibración convencional²².

La alteración en la relación polvo de yeso/agua es señalada también como un factor que afecta la dureza superficial, al igual que la resistencia a la compresión. Si se disminuye la proporción polvo/agua (g/ml) se facilita el manejo del material, pero se debilita la masa por aumento de la porosidad¹⁹.

El resultado de esta experiencia, aunque las diferencias entre los grupos no fueron significativas, permite aceptar la hipótesis de trabajo.

En lo que respecta a la expansión lineal de fraguado, la precisión y estabilidad dimensional son cruciales ya que las normas ISO y ADA establecen que los yesos piedra de alta resistencia no deben superar los 0.00 a 0.01 (0-1 %) de expansión lineal durante el fraguado.

Una baja expansión de fraguado se asocia directamente con alta precisión y capacidad de reproducción de detalles de los yesos tipo IV.

Esta propiedad es una consecuencia inevitable de la presión de crecimiento cristalino que ocurre cuando los cristales de dihidrato entran en contacto.

En el desarrollo de esta investigación, los ensayos se realizaron utilizando un extensómetro siguiendo estrictamente las normas ISO. Se observó que el uso del polímero genera una menor expansión de fraguado en comparación con el grupo control, con una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.01$).

Diversos autores han empleado metodologías variadas para el análisis de esta propiedad, por ejemplo, Cruzado-Oliva et al.⁶² utilizaron probetas

rectangulares y un calibrador digital. Otros autores, como Heshmati et al.⁴¹ emplearon un extensómetro electrónico de expansión lineal con probetas de sección prismática triangular (similares a las utilizadas en este ensayo). También se ha documentado la medición de esta propiedad mediante un microscopio estereoscópico³⁰.

En este ensayo, los registros realizados cada 30 minutos evidenciaron un desarrollo de la expansión que culminó a los 90 minutos. Posteriormente, los valores se estabilizaron y se mantuvieron constantes hasta las 24 horas, donde se realizó la lectura definitiva sin que se observaran modificaciones detectables bajo las condiciones de trabajo utilizadas y mediante el sistema de medición empleado.

Heshmati et al., comprobaron la existencia de una expansión retardada de los yesos tipo IV al realizar sus mediciones mediante un extensómetro electrónico hasta 120 horas posteriores al vaciado. A las 2 horas, registraron valores compatibles con lo sugerido por los fabricantes, pero encontraron que la expansión continuó hasta las 96 horas. Respecto al Silky Rock, material utilizado en este estudio, a las 120 horas la expansión detectada por los autores mencionados fue de 1.4 % aunque a las 96 horas se había detenido. Sin embargo, no se mencionan las condiciones de almacenamiento de las muestras durante el periodo de lectura⁴¹.

Otros autores llegaron a conclusiones similares respecto a la existencia de expansión retardada, pero advierten que las condiciones medioambientales son factores para tener en cuenta por su incidencia directa en los resultados, en particular la humedad relativa ambiente⁷⁸.

Darvell y Michalakis coinciden en que factores como el tipo de yeso, la temperatura ambiente, la humedad relativa y las condiciones de almacenamiento pueden afectar significativamente los cambios dimensionales^{17,78}.

En este trabajo, las variables mencionadas fueron controladas, al igual que aquellas que de una u otra manera pudieran afectar el comportamiento del producto, para evitar la incorporación de variables ocultas que pudiesen incidir en el resultado.

Otras publicaciones señalan la importancia de factores relacionados con la manipulación durante su preparación, como alteración en la proporción polvo/agua, uso de agua de red en lugar de agua destilada, velocidad y tiempo de espátulado, temperatura del agua y ambiental, al igual que condiciones de almacenamiento del material. Concluyen también que sus efectos son muy críticos y pueden afectar la expansión del fraguado de los productos de yeso^{11,19,20}.

La reducción de la expansión se produjo en relación directa con la concentración del polímero estireno.

El resultado de esta evaluación sugiere que las propiedades de los polímeros de estireno son muy ventajosas para su uso en el control de la expansión de fraguado. Su acción como aglomerante en el yeso y su capacidad para limitar la absorción de agua son factores que contribuyen positivamente a esta mejora.

De acuerdo con la evaluación del resultado obtenido, se puede aceptar la hipótesis de trabajo.

Podría ser de interés realizar una evaluación que extienda los tiempos de medición de la expansión de fraguado para analizar la posibilidad de cambios dimensionales retardados hasta una semana posterior al llenado de las muestras.

Por otra parte, la capacidad de un material de soportar una carga de compresión sin fracturarse es esencial en los yesos dentales utilizados para

la confección de modelos de trabajo para resistir las fuerzas aplicadas durante los procedimientos de laboratorio⁵⁰.

Se realizó una serie de ensayos utilizando probetas cilíndricas de 20 mm de diámetro y 40 mm de altura, pero los mismos fueron fallidos debido a la obtención de valores totalmente dispersos y no confiables. Tras estandarizar el tamaño de las probetas a cilindros de 14 mm de diámetro y 14 mm altura, se realizó el ensayo siete días después.

Diversos autores consultados realizaron la medición de la resistencia a la compresión con máquinas universales de ensayos de materiales al igual que en el presente estudio. Sin embargo, se observó el uso de probetas disímiles, en tamaño y forma^{30,35,40,62}.

Los resultados obtenidos indicaron una resistencia a la compresión de 28,44 MPa en aquellas muestras en las que el yeso se preparó con agua destilada y valores algo menores al utilizar polímero estireno; 24,663 y 21,986 MPa para las preparadas al 12.5% y 25% respectivamente. Entre los grupos la diferencia no fue significativa a pesar de la pérdida de resistencia ($P=0.35$).

Se podría considerar que la formación de una capa superficial de mayor densidad estructural en las muestras genera mayor dureza superficial, restando flexibilidad al material lo que reduciría su ductilidad, aunque los valores registrados no muestren un comportamiento dispar significativo.

Las condiciones de transporte y almacenamiento por parte de los proveedores, los cuidados durante el fraccionamiento del producto y las posteriores condiciones de su empaquetamiento podrían tener incidencia directa sobre las propiedades del producto original, lo cual podría constituir una variable oculta no deseada e incontrolable por el investigador, quien desde el momento de adquirir el producto es responsable de las condiciones de almacenamiento y su posterior manipulación.

Al preparar el producto, el aumento de la proporción polvo/agua reduce sustancialmente la resistencia a la compresión del yeso. Esto se debería a que una mayor cantidad de agua genera mayor porosidad y disminución de la cantidad de núcleos de cristalización por volumen, debilitando el material^{11,52,71,79-82}.

Los agregados de sílice y aluminio disminuyen la resistencia compresiva de los yesos. Una alta concentración de estos aditivos puede disminuir la cohesión entre los cristales de yeso, determinando esta pérdida de resistencia^{32,40}.

Asimismo, al analizar los resultados de la resistencia compresiva diametral y la resistencia a la fractura por tracción en materiales frágiles como los yesos, se observa que los valores obtenidos son equivalentes y reducidos debido a su naturaleza porosa⁸³.

Los yesos tipo IV deben presentar una resistencia a la tracción en húmedo de 2,3 MPa, valor que se duplica tras el fraguado final (4,6 MPa); debido a este incremento progresivo, la evaluación estandarizada se realiza a los siete días¹¹.

Esta propiedad es crítica y requiere optimización, ya que una baja resistencia propicia fracturas frecuentes en los modelos durante el desmolde de impresiones de elastómero, particularmente en preparaciones delgadas o con socavados acentuados

Según Von Fraunhofer et al., la resistencia traccional no se ve afectada por el ancho, espesor ni longitud de las probetas. Sin embargo, la relación polvo/agua sí afecta esta propiedad⁹.

En este trabajo, los resultados registrados a los siete días de realizada la confección de las muestras fueron para el grupo con agua de 5,00 MPa, reduciéndose en el grupo B adicionado con polímero al 12,5%, a 4,48 MPa y

a 4,35 MPa para el grupo C (25%). Las diferencias registradas entre los grupos no fueron significativas ($P=0.64$) y los valores son próximos a los estándares internacionales, solo superados por el grupo donde se utilizó agua destilada para la preparación del material.

En la literatura no se registran informes de trabajos similares, pero sí publicaciones donde se plantea el uso de distintos materiales de relleno con el objetivo de mejorar esta propiedad. En igual medida, hay reportes sobre la utilización de distintas sustancias empleadas para impregnar modelos luego de su confección^{11,52}.

Algunos autores señalan que la adición de nanopartículas de sílice provoca una reducción significativa en la resistencia a la tracción diametral media³⁵.

Otros estudios también informan sobre una disminución de la resistencia a la tracción, al aumentar el porcentaje de SiO_2 y Al_2O_3 y concluyen que disminuirían la cohesión entre los cristales de yeso^{40,44,85}.

La impregnación mediante monómeros de metacrilato de metilo produce mejoras en la resistencia a la tracción⁵².

Seguidamente, al evaluar la respuesta de la resistencia a la flexión mediante la prueba de carga en tres puntos bajo estándares ISO, se evidenció una alteración significativa en el desempeño estructural del material aditivado. En el presente estudio, los valores descendieron de una media de 20,30 MPa en el grupo control a 13,11 MPa y 14,51 MPa en los grupos experimentales con soluciones de polímero al 12,5 % y 25 %, respectivamente.

El análisis comparativo determinó que estas reducciones son estadísticamente significativas ($P<0.01$), lo que sugiere que la incorporación del polímero estireno-acrílico, si bien optimiza otras propiedades superficiales, induce un compromiso en la resistencia del yeso tipo IV frente a esfuerzos transversales.

Otros autores reportaron valores variables entre 6 y 15 MPa al realizar este ensayo en las máquinas de ensayo de materiales¹¹.

Podría señalarse que el yeso tipo IV es bastante rígido y el aumento de dureza superficial que se produce al adicionar estireno acrílico podría justificar una menor resistencia a la flexión, aunque esto no parece estar en relación con la concentración del producto.

Los determinantes de cambios en la resistencia a la flexión, al igual que en las propiedades ya analizadas relacionadas a fracturas de los productos de yeso, responden a las mismas variables^{11,52,71,79-82}.

Una alta resistencia a la flexión es deseable, puesto que minimiza el riesgo de que las partes delgadas del modelo se rompan durante la manipulación, en particular al retirarlos de impresiones tomadas con elastómeros.

En este trabajo, los valores registrados son coincidentes con los observados en distintos ensayos reportados donde, para mejorar sus propiedades mecánicas, se investigaron variados materiales incorporados al yeso durante su manipulación o con posterioridad a su fraguado, obteniendo efectos dispares^{40,49}.

El análisis de resistencia compresiva a la tracción y flexión muestra una respuesta coincidente sobre una disminución en la resistencia del yeso tipo IV analizado, al adicionarle las distintas soluciones de polímero estireno acrílico durante su preparación.

No se registraron en la literatura estudios similares donde se analice la utilización de polímeros estirenos, pero distintos estudios realizados con sílice y aluminio demostraron que una alta concentración tiende a reducir la resistencia a la flexión puesto que estos aditivos pueden disminuir la cohesión entre los cristales de yeso^{32,40}.

La evaluación de resistencia a la compresión, tracción y flexión muestra un resultado no óptimo pero aceptable en los valores de resistencia del yeso tipo IV utilizado cuando se le adiciona polímero estireno acrílico durante su preparación en reemplazo de agua destilada, por lo que se rechaza la hipótesis de trabajo.

En consonancia con el estudio de las propiedades de los yesos, se evaluó la resistencia al desgaste, la cual es una propiedad fundamental que determina la durabilidad y precisión de los modelos y relacionada directamente con la dureza superficial.

Una baja resistencia al desgaste podría alterar los márgenes y comprometer el ajuste final de la prótesis.

Este análisis evidenció la mayor variación entre grupos, siendo el yeso mezclado con agua bidestilada el que mostró el mayor promedio de desgaste (0,26 %), mientras que las mezclas con 12,5 % y 25 % de polímero redujeron este valor a 0,10 % y 0,02 % respectivamente.

Este resultado mostró un efecto altamente positivo al incorporar el polímero estireno al yeso tipo IV, estableciéndose una diferencia altamente significativa entre los grupos evaluados ($P < 0.0001$).

Los resultados obtenidos por Peyton con su máquina de desgaste no resultan comparables con los obtenidos en esta experiencia por la diferencia en la metodología de trabajo utilizada⁷¹.

Diversos estudios sobre la abrasión demostraron que no hay mejora en la resistencia al desgaste cuando un yeso de alta resistencia se endurece comercialmente con soluciones de sílice coloidal^{9,11,62}.

El agregado de endurecedores superficiales (como el polímero PMMA o el cianoacrilato) puede mejorar ligeramente la resistencia a la abrasión, aunque

la evidencia sugiere que no aumenta considerablemente la resistencia a la indentación e incluso podría empeorar^{74,76}.

Teniendo en cuenta estos estudios, se puede coincidir con Mazumdar y Chowdhury quienes concluyen que mayor dureza superficial no implica mayor resistencia a la abrasión, ya que solo constituye uno de los muchos factores que afectan el desgaste⁸⁵.

Los resultados obtenidos en referencia a la resistencia al desgaste al incorporar polímero estireno acrílico en sus distintas proporciones fueron altamente positivos por lo que la hipótesis de trabajo es aceptada.

Bajo la misma línea de análisis, se estudió la reproducción de detalles. Esta se refiere a la capacidad de los materiales para replicar con fidelidad las características finas y minuciosas de las estructuras.

Los yesos tipo IV presentan, en general, alta precisión y capacidad de reproducir los detalles más finos en comparación con otros yesos dentales. Esta cualidad se asocia directamente a su baja expansión de fraguado, su alto grado de compactación y a su mínima microporosidad.

La especificación ADA N°19 y la ISO 6873/2013 determinan que la reproducción es satisfactoria si se replica un surco de 0.05 mm (50 μ m) de ancho de forma clara y continua^{2,70,79,86,87}.

El resultado se obtiene por observación mediante lupa estereoscópica a una magnificación de 10X.

En este estudio, la totalidad de las muestras mostraron un 100 % de reproducción de los detalles analizados al evaluar las distintas líneas de referencia contenidas en la probeta de ensayo (25, 50 y 75 μ m) por lo que la hipótesis de trabajo es aceptada.

CONCLUSIONES

Con las limitaciones propias de este estudio, se puede concluir que la incorporación de polímero estireno-acrílico al yeso tipo IV produce efectos diferenciados según la propiedad evaluada.

El uso de estireno acrílico genera mejoras en la dureza superficial, una reducción significativa de la expansión lineal de fraguado y una notable disminución del desgaste, sin afectar la capacidad de reproducción de detalles. En contraste, las resistencias a la compresión, tracción diametral y flexión mostraron una disminución, indicando un impacto negativo del polímero sobre la cohesión interna del material.

En términos generales, la modificación del yeso con polímero estireno-acrílico se presenta como una alternativa válida para mejorar parámetros críticos de precisión clínica, aunque no constituye una estrategia adecuada cuando se requiere optimizar la resistencia mecánica del material.

Aportes a la profesión: este trabajo aporta evidencia experimental que contribuye a comprender mejor la interacción entre aditivos poliméricos y la matriz cristalina del yeso, ofreciendo bases útiles para el desarrollo de nuevas formulaciones y para la estandarización de metodologías de evaluación en materiales odontológicos.

Para dar continuidad a los resultados obtenidos en esta tesis, se proponen las siguientes líneas de investigación:

- a. Analizar posibles cambios dimensionales retardados bajo distintas condiciones de almacenamiento ambiental.

- b. Evaluar formulaciones con concentraciones de polímero superiores al 25 % para identificar el umbral de mejora en la dureza superficial sin comprometer la resistencia a la flexión.
- c. Realizar ensayos de carga cíclica para determinar la vida útil del material ante la inserción y remoción frecuente de estructuras protéticas, simulando el desgaste real en flujos de trabajo complejos.
- d. Investigar la respuesta del material frente a cambios térmicos bruscos (vapor de agua o calentamiento de ceras) para evaluar la estabilidad de la matriz polimérica bajo estrés térmico.
- e. Caracterizar mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) la infiltración polimérica en los espacios intercristalinos, a fin de validar objetivamente la reducción de la microporosidad y los mecanismos estructurales propuestos.
- f. Evaluar si la incorporación de estireno-acrílico genera reacciones químicas con elastómeros de impresión (siliconas por adición o condensación) que pudieran alterar la fidelidad superficial del duplicado.
- g. Analizar la respuesta de los modelos aditivados ante protocolos de desinfección clínica (glutaraldehído, hipoclorito de sodio, plasma de oxígeno o luz UVC) para determinar su resistencia a la degradación química.
- h. Evaluar la compatibilidad con sistemas de escaneo extraoral,

analizando si las variaciones en la densidad superficial y la reducción de microporos alteran la reflectancia lumínica y la precisión de la triangulación láser o luz estructurada.

- i. Estudiar la reciclabilidad de estos yesos compuestos y la recuperación de sus componentes, alineando la práctica odontológica con los estándares de economía circular y reducción de la huella de carbono.

BIBLIOGRAFÍA

1. Shem C, Rawls H, Esquivel-Upshaw J. KJ. Phillips, science of dental materials. 13ª ed. Barcelona: Elsevier; 2022.
2. Nejatian T, Firouzmanesh P, Yaqin Syed A. En: Dental gypsum and investments. Khurshid Z, Najeeb S, Zafar M, Sefat F. En *Advanced Dental Biomaterials*. Arabia Saudi. Woodhead Publishing; 2019. p. 37–54.
3. Kati FA, N. Yassin NI, Razak WA. Effect of adding some additives and drying method on compressive strength of gypsum products. *TJDS*. 2017 Jun 1;5(1):25-32.
4. Macchi RL. *Materiales dentales*. 4ª ed. Buenos aires: Editorial Médica Panamericana; 2007. 406 p.
5. Hersek N, Canay Ş, Akça K, Çiftçi Y. Tensile strength of type IV dental stones dried in a microwave oven. *J Prosthet Dent*. 2002 May;87(5):499-502.
6. Othman SK, Ali AR. Suitability of dental stone preparation using local gypsum and sodium chloride. *Iraqi Geol J*. 2023 Aug 31;56(2):175-80.
7. Toledano Pérez M, Osorio Ruiz R, Sánchez Aguilera F, Osorio Ruiz E. *Arte y ciencia de los materiales odontológicos*. Madrid: Ediciones Avances Médico-Dentales SL;2003.
8. Rodriguez JM, Curtis RV, Bartlett DW. Surface roughness of impression materials and dental stones scanned by non-contacting laser profilometry. *Dent Mater*. 2009 Apr;25(4):500-5.

9. Von Fraunhofer JA, Spiers RR. Strength testing of dental stone: A comparison of compressive, tensile, transverse, and shear strength tests. *J Biomed Mater Res.* 1983 Mar 13;17(2):293-9.
10. Persson A, Andersson M, Odén A, Sandborgh-Englund G. Computer aided analysis of digitized dental stone replicas by dental CAD/CAM technology. *Dent Mater.* 2008 Aug;24(8):1123-30.
11. Sakaguchi R, Ferracane J, Powers J. *Craig's Restorative dental materiales.* 14th. Arabia Saudi. Elsevier; 2019.p.250-60.
12. *ISO 6873-2013. ISO Standards for Dental Products & Gypsum.* Switzerland; 2013.
13. Álvarez Cantoni H, Fassina N. Colección: Fundamentos, técnicas y clínica en rehabilitación bucal. Tomo 2: Prótesis total removible. Buenos Aires: Editorial Hacheace; 2002. p.50-52
14. Vega del Barrio JM., Abalos Labruzzo C. *Materiales en odontología: fundamentos biológicos, clínicos, biofísicos y fisicoquímicos.* 1a ed. Madrid: Editorial Avances Médico-Dentales S.L.; 1996. 598 p.
15. Smith B, Wright P, Brown D. *Utilización clínica de los materiales dentales.* 2a ed. Barcelona: MASSON SA; 1996. 314 p.
16. Mc Intyre FM, Butta R, Tredwin C. Type IV Gypsum Compatibility With Five Addition-Reaction Silicone Impression Materials. *Yearb Dent.* 2006 Jan;2006:52-3.
17. Darvell BW. *Gypsum Materials.* In: *Materials Science for Dentistry.* Elsevier; 2018. p. 40-69.

18. Prombonas AE, Paralika MA, Sotiriou MP, Vlissidis DS. The peak-amplitude method of vibration analysis for nondestructively studying the structural integrity of dental gypsum. *J Biomed Mater Res.* 2002;63(5):605-9.
19. Subhan R, Choudhry Z, Pervaiz K, Malik S. The effect of diverse water type on the water powder ratio of various dental gypsum products. *Dent Mater.* 2016 Jun 26;36(2).
20. Azer SS, Kerby RE, Knobloch LA. Effect of mixing methods on the physical properties of dental stones. *J Dent.* 2008 Sep;36(9):736-44.
21. Khaza'i A, AL-Noori AK, Elias M. Compressive Strength of Type IV Dental Stone with Ag Nanoparticles. *Al-Rafidain Dent J.* 2019 Dec;19(1).
22. Aljafery AM, Alkafagy M, Wally ZJ, Dheyaa AM, Almusawi RM, Haider J. Studying the effect of using ultrasoundvibration on the reproduction of detail and surface hardness of dental stone models. *Nano Biomed Eng.* 2022;14(3):263-71.
23. Pandey PA, Mehtra DA. Comparative study of dimensional stability and accuracy of various elastomeric materials. *IOSR J Dent Med Sci.* 2014;13(3):40-5.
24. Duke P, Moore B, Haug S, Andres C. Study of the physical properties of type IV gypsum, resin-containing, and epoxy die materials. *J Prosthet Dent.* 2000. Apr;83(4):466-73.
25. Queiroz ME, Santos Proença J, Ruiz Contreras F. Evaluation of the Physical-Mechanical Properties of Type IV Gypsum. *J Health Sci.* 2021 Mar 18;23(1):07-11.

26. Fairhurst CW. Compressive Properties of Dental Gypsum. *J Dent Res.* 1960;39(4):812-24.
27. Jayaprakash K, Upadhya P, Nandish B, Shetty A, Shetty K, Ginjupalli K, et al. Impact of Water Quality and Water Powder Ratio on the Properties of Type 4 - Die Stones (Gypsum Products) used in Dentistry. *Int J Health Rehabil Sci (IJHRS).* 2014;3(2):75.
28. Mudliar V, Singh S, Meenal Y. Influence of Water Type and Water/Powder Ratio on the Strength and Hardness of Type III and IV Gypsum. *Biomed J Sci Tech Res.* 2023 Feb 6;48(3).
29. Sannigrahi¹ R, Upadhyay² M, Agarwal³ G, Rai P, Kulbhaskar D. Analysing the effect of silica nano particles on mechanical properties of dental stone and die stone:An in -vireo study. *J Prosthodont Dent [Internet].* 2023. 18(2):1. Disponible en: <http://heb-nic.in/jopd>
30. Radesh P, Rezaei Y, Negahdari R, Haji Jafarabadi S, Samadnezhad A, Fahimi M, et al. The Effect of Adding Silica Nanoparticles on the Compressive Strength and the Dimensional Accuracy of Type IV Dental Stone. *Open Dent J.* 2024 Aug23;18(1).
31. Fukui H, Lacy A, Jendresen M. Effectiveness of hardening films on die stone. *J Prosthet Dent.* 1980 Jul;44(1):57-63.
32. Hamdy T, Abdelnabi A, Abdelraouf R. Reinforced dental plaster with low setting expansion and enhanced microhardness. *Bull Natl Res Cent.* 2020 Dec 27;44(1):78.
33. Abdelaziz K, Attia A, Combe E. Evaluation of disinfected casts poured in gypsum with gum arabic and calcium hydroxide additives. *J Prosthet Dent.* 2004 Jul;92(1):27-34.

34. Abdelaziz K, Combe E, Hodges J. The effect of disinfectants on the properties of dental gypsum, part 2: Surface properties. *J Prosthodont Implant, Esthet and Reconstruct Dent.*2004 Dec;11(4):234-40.
35. de Cesero L, Mota EG, Burnett LH, Spohr AM. The influence of postpouring time on the roughness, compressive strength, and diametric tensile strength of dental stone. *J Prosthet Dent.* 2014 Dec;112(6):1573–7.
36. Motong N, Ukaew S, Tianboot K, Mahachon K. The effect of acid treatment time, particle size, and synthesis method on the physical and mechanical properties of dental materials produced from flue gas desulfurization (FGD) gypsum. *Asian Health Sci Technol Rep.* 2024;32(1):78–91.
37. Jasim Zaid M, Abass S. The Effect of Hypochlorous Acid Disinfectant on the Reproduction of Details and Surface Hardness of Type III Dental Stone. *Cureus.* 2022 Nov 30.
38. Buchanan A, Worner K. A study of the action of borax in retarding the setting of plaster of Paris. *J Soc Chem Ind.* 1946 Jan;65(1):23-6.
39. Jiang W, Pan H, Tao J, Xu X, Tang R. Dual Roles of Borax in Kinetics of Calcium Sulfate Dihydrate Formation. *Langmuir.* 2007 Apr1;23(9):5070-6.
40. Akkus B, Demir N, Karci , M, Yazman S. Compressive and Diametral Tensile Strength of Dental Stones with SiO₂ and Al₂O₃ Nanoparticles. *Int J Med Sci Innov Res (IJMSIR).* 2018 Oct;3(5):139-47.
41. Heshmati R, Nagy W, Wirth C, Dhuru V. Delayed linear expansion of improved dental stone. *J Prosthet Dent.*2002;88(1):26-31.

42. De Cesero L, de Oliveira E, Burnett Junior L, Papaléo R, Mota E. The addition of silica nanoparticles on the mechanical properties of dental stone. *J Prosthet Dent* 2017 Oct;118(4):535-9.
43. Salah A, Al-Noori A, Elias M. Compressive Strength of Type IV Dental Stone With ZnO Nanoparticles. *Al-Rafidain Dent J*. 2018 Nov 30;19(1):70-9.
44. Salah A, Alnori A, Elias M. Compressive Strength of Type IV Dental Stone With Ag Nanoparticles. *Al-Rafidain Dent J*. 2018 Nov 30;19(1):60-9.
45. Ghadeer F. Evaluation Effect of Oyster Shell Powder on The Surface Hardness and Compressive Strength of Dental Stone Introduction. *TJDS [Internet]*.2024;12(2):338-44.Disponible en: <https://doi.org/10.25130/tjds.12.2>.
46. Amer A, Nada Z, Tariq Y. The_Effect_of_Adding_Some Chemical Materials on The Water_Powder Ratio of Dental Stone. *Rev Int Investig Acad Salud Med (IAHMR)*. 2018 Jul;2(7).
47. Tuncer N, Tufekgioglu H, Calikkocaoglu S. Investigation on the compressive strength of several gypsum products dried by microwave oven with different programs. *J Prosthet Dent*. 1993.69(3)333 – 39.
48. Yan' W, Yuan' G, Jin' L, Wang B, Liu J. Strengthening a dental gypsum model by infiltration of cyanoacrylate. *China J Stomatol [Internet]*. 2014;32(3). Disponible en: http://www.hxkqyxzz.net229*
49. Ali A, Gaur A, Pandey K, Tyagi S, Tarannum F, Azeem M, et al. Comparative Evaluation of Compressive and Diametral Tensile Strength in Die Stone Reinforced With Different Types of Nanoparticles: An In Vitro Study. *Cureus*. 2023 Jun 29.

50. Aghbolaghi N, Maleki Dizaj S, Negahdari R, Jamei Khosroshahi A, Rezaei Y, Bohlouli S, et al. Effect of Adding Silica Nanoparticles on the Physicochemical Properties, Antimicrobial Action, and the Hardness of Dental Stone Type 4. *Int J Dent*. 2022 Apr 26;2022:4762017. Doi: 10.1155/2022/4762017.
51. Jabeen B, Mirani Z, Lone M, Nirkhiwale A, Farooqui W, Aslam K, et al. Comparison of Chlorhexidine Gluconate, Sodium Hypochlorite, Neem Extract, and Microwave Radiation for Disinfection of Type IV Dental Stone. *Eur J Dent*. 2025 May 10;19(02):346-53.
52. Earnshaw R, Smith D. The tensile and compressive strength of plaster and stone. *Aust Dent J*. 1966 Dec 22;11(6):415-22.
53. Aguirre M, Ballard N, Gonzalez E, Hamzehlou S, Sardon H, Calderon M, et al. Polymer Colloids: Current Challenges, Emerging Applications, and New Developments. *Macromolecules*. 2023 Apr 11;56(7):2579-607.
54. Aranberri I, Binks B, Clint P, Fletcher. Elaboración y caracterización de emulsiones estabilizadas por polímeros y agentes tensioactivos. *Rev Iberoam Polím*. 2006 Aug;7(3).
55. Lokensgard E, Richardson T. *Industria del plástico: plástico industrial*. 1a ed. Paraninfo; 1999. p.17-23
56. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. *Toxicological Profiles*. [Internet]. Atlanta; 2009 [citado 2025 Nov 5]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK153665/>
57. Fried J. *Polymer science and technology*. 3ª ed. Ohio: Prentice Hall; 2014. p.312-328.

58. Tamošaitienė J, Parham S, Sarvari H, Chan D, Edwards D. A Review of the Application of Synthetic and Natural Polymers as Construction and Building Materials for Achieving Sustainable Construction. *Buildings*. 2024 Aug 20;14(8):2569.
59. Pal S, Tiwari S, Katyal K, Singh A. Effect of Polymer Modification on Structural and Mechanical Properties of Concrete Using Epoxy Emulsion as the Modifier. *Innov. Mater. Sci. Eng.* Springer Singapore; 2019. p. 1-10.
60. Charfeddine I, Majesté J-C, Carrot C, Lhost O. A model for the prediction of the morphology of immiscible blends of polymers. *Polym*. 2020;193:122334. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMER.2020.122334>.
61. Adapted from ATSDR Toxicological Profile for Styrene and the website of the European Styrene Producers Association. Styrene Information & Research Center. Towson; 2014.
62. Cruzado-Oliva F, Farfán-Verástegui G, Alarco-La Rosa L, Arbildo-Vega H. Análisis In vitro de yesos dentales de alta resistencia y baja expansión disponibles en Perú. *Odontol Sanmarquina*. 2023;26(3).
63. Sanad MEE, Combe EC, Grant AA. Hardening of model and die materials by an epoxy resin. *J. Dent*. 1980 Jun;8(2):158–62.
64. Sanad MEE, Combe EC, Grant AA. The effect of model sealant solutions on the properties of gypsum. *J. Dent*. 1980 Jun;8(2):152–7.
65. Bajada SB, Makinson OF. The effect of some surface treatments to dental modelling stones. *Aust Dent J*. 1974 Apr;19(2):118–21.
66. Fan PL, Powers JM, Reid BC. Surface Mechanical Properties of Stone, Resin, and Metal Dies. *J Am Dent Assoc*. 1981 Sep;103(3):408–11.

67. Choudhary S, Banerjee A, Giri T, Ajit Kumar R. Study of Surface Hardness of Gypsum Casts Made with Slurry Water: An in Vitro Study. *Journal of Dental and Medical Sciences (IOSR-JDMS)*. 2016 Dec;15(12):23–6
68. Tameem K. Comparison of some properties between commercially available gypsum products. *TJDS*.2012 Jun 1;2(1):63–9.
69. Williams GJ, Bates JF, Wild S. The effect of surface treatment of dental stone with resins. *QDT*. 1983 Jan;7(1):41–5.
70. Chang Y, Yu C, Liang W, Tu M, Chen S. Comparison of the surface roughness of gypsum models constructed using various impression materials and gypsum products. *J. Dent. Sci.*2016 Mar;11(1):23–8.
71. Peyton FA, Leibold JP, Ridgley GV. Surface hardness, compressive strength, and abrasion resistance of indirect die stones. *J Prosthet Dent*. 1952 May;2(3):381–9.
72. AlKahtani R. The implications and applications of nanotechnology in dentistry: A review. *SDJ*. 2018 Apr;30(2):107–16.
73. Osterwalder N, Loher S, Grass RN, Brunner TJ, Limbach LK, Halim SC, et al. Preparation of nano-gypsum from anhydrite nanoparticles: Strongly increased Vickers hardness and formation of calcium sulfate nano-needles. *J. Nanoparticle Res*. 2007 Mar 10;9(2):275–81.
74. Tripathi A, Gupta A, Bagchi S, Mishra L, Gautam A, Madhok R. Comparison of the Effect of Addition of Cyanoacrylate, Epoxy Resin, and Gum Arabic on Surface Hardness of Die Stone. *J Prosthodont*. 2016 Apr;25(3):235–40.

75. Aljubori O, Aljafery A, Al-Mussawi R. Evaluation of the Linear Dimensional Changes and Hardness of Gypsum Product / Stone Type IV after Adding Silica Nanoparticles. *Nano Biomed. Eng.* 2020 Aug 11;12(3):227–31.
76. He L, van Vuuren L, Planitz N, Swain M. A micro-mechanical evaluation of the effects of die hardener on die stone. *Dent. Mater. J.* 2010 Aug;29(4):433–7.
77. Sudhakar A, Srivatsa G, Shetty R, Rajeswari CL, Manvi S. Evaluation of the Various Drying Methods on Surface Hardness of Type IV Dental Stone. *J Int Oral Health.* 2015 Jun;7(6):103-6.
78. Michalakis K, Asar N, Kapsampeli V, Magkavali-Trikka P, Pissiotis A, Hirayama H. Delayed linear dimensional changes of five high strength gypsum products used for the fabrication of definitive casts. *J Prosthet Dent.* 2012 Sep;108(3):189–95.
79. Casemiro L, Hamida H, Panzeri H, de Carvalho Pires-de-Souza.F. Materiales para modelado: evaluación de los tiempos de presa, resistencias a la tracción, compresión y partículas (MEV). *Rev. odonto ciênc.* 2006 Oct;21(53).207-11.
80. van Noort R, Barbour M. *Introduction to dental materials.* 4th. Mosby Elsevier; 2015. p.246.
81. Mitra SB, Wu D, Holmes B. An application of nanotechnology in advanced dental materials. *The Journal of the American Dental Association.* 2003 Oct;134(10):1382–90.
82. Wu Q, Miao W shou, Zhang Y du, Gao H jun, Hui D. Mechanical properties of nanomaterials: A review. *Nanotechnol. Rev.* 2020 Mar 24;9(1):259–73.
83. Khairani Aulia R, Sumantri D, Ikhsan W, Nugraha S, Rizkiamalia K, Kasuma N, et al. Effect of White Portland Cement Addition on Type III Dental Gypsum


Compressive Strength. J Int Dent Med Res [Internet]. 2023;16(2):560–4. Available from: <http://www.jidmr.com>

84. Tsardaka EC, Stefanidou M. Testing nano-silica and nano-alumina additions for enhancing the durability of cement and lime pastes. Mater.Today Proc. 2021; 37:4082–90.
85. Mazumdar P, Chowdhury D. An in vitro comparative evaluation of surface roughness of different restorative materials using a dentifrice and a customised automated tooth brushing machine. *Baba Farid Univ Dent J.* 2018 Dec;8(1).
86. Hekmatfar S, Mousavi S, Mohammadian H, Jafari K. Evaluation of dimensional changes and detail reproduction of three type IV dental gypsums. *J. Dent. Med.* 2019;32(2):92–7.
87. Malaviya N, Ginjupalli k, Kalahasthi D, Yadav A, Kapoor D, Garg D. Sterilization of gypsum cast and dies by microwave irradiation -an in vitro study. *Int J Contemp Med Res.* 2016 Apr;3(4):982| – 86.

ANEXOS

Anexo 1: Certificados




 **UBA**
Universidad de Buenos Aires

UBA ODONTOLÓGIA
Facultad de Odontología

Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 02 de junio de 2025.-

—Dejo constancia que VILLEGAS, Verónica, ha realizado ensayos para su Tesis en el Centro de Estudios y Control de Materiales Dentales (C.E.C.Ma.Den) perteneciente a la Cátedra de Materiales Dentales de la Facultad de Odontología de la Universidad de Buenos Aires, durante los días 19 de septiembre y 08 de noviembre del 2019.



Dra. Mariana Picca
Prof. Titular Regular
Cátedra de Materiales Dentales
F.O.U.B.A.

Morón T. de Alvar 2142, Ciudad Federal, Argentina. Tel. (054 11) 5287-6000 www.odontologia.uba.ar

 **UNCUYO**
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ITEM
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE INVESTIGACIONES Y ENLACES DE MATERIALES

LABORATORIO DE METALES, MATERIAS Y MATERIALES ESPECIALES

Mendoza 27 de Octubre de 2025

A quien corresponda:

Por la presente se deja constancia que la **Odontóloga VERÓNICA VILLEGAS CRESPO**, DNI 23571515, ha realizado ensayos de materiales de uso odontológico en nuestros laboratorios de "Química" y de "Metales, Maderas y Materiales Especiales" y recibido apoyo por parte de la Cátedra de "Ciencia de los Materiales" en el cálculo de resultados sobre las muestras ensayadas como parte de su tesis doctoral.


Sin otro particular.



Dra. Ing. Lucía Brattler
Secretaría Académica
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Cuyo

SV SECRETARÍA DE VINCULACIÓN | DETI DIRECCIÓN DE ESTUDIOS TECNOLÓGICOS E INVESTIGACIONES

Centro Universitario (5002)UBA Ciudad de Mendoza
Provincia de Mendoza - Argentina
Calle de acceso 450
Tel. +54-261 410000 int 2192 Fax: +54-261-406120
inf@ingenieria.uncuyo.edu.ar



Mendoza, 20 de octubre de 2025

A quien corresponda:

Por la presente, dejo constancia de que la Odontóloga Verónica Villegas Crespo, D.N.I.: 23.571.515, ha llevado a cabo las actividades experimentales necesarias para el desarrollo de su Tesis Doctoral en nuestro laboratorio.

Asimismo, se certifica que la mencionada tesista recibió apoyo técnico y asesoramiento en el uso de instrumental y aparatología para la confección de las probetas.

Esta constancia se emite a solicitud de la interesada, para ser presentada como parte de la documentación de su Tesis Doctoral.

Atentamente,



Catarina Viana
Mat. 6519

 **UNCUYO** **50**
FACULTAD DE ODONTOLÓGIA

2025
100 años de FUNDACIÓN Y 100 años de INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

Certifico que la Od. Esp. Verónica Villegas Crespo, DNI 23.571.515, accedió al uso de equipamiento de microscopía óptica del laboratorio de estudio de materiales dentales del Centro de Investigación odontológico perteneciente a esta facultad durante el mes de noviembre del año 2019.

Mendoza, 14 de noviembre de 2025



Od. Esp. Rodrigo Stoehr
Secretario de Ciencia y Tecnología



Anexo 2: Publicación en revista científica y enlaces de acceso

-Villegas Crespo V, Carlos Albera J. Análisis comparativo de las propiedades del yeso dental tipo IV tradicional frente a mezclas con polímeros estireno-acrílicos en base acuosa. Ciencia Latina [Internet]. 21 de octubre de 2025 [citado 4 de diciembre de 2025];9(5):6938-5. Disponible en: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/20084>.

Inicio / Archivos / Vol. 9 Núm. 5 (2025) / Ciencias de la Salud

Análisis comparativo de las propiedades del yeso dental tipo IV tradicional frente a mezclas con polímeros estireno-acrílicos en base acuosa

Verónica Villegas Crespo
 Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Odontología. Carrera de Especialización en Protoprotesis.
<https://orcid.org/0009-0004-8565-6945>

Juan Carlos Albera
 Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Odontología. Carrera de Especialización en Protoprotesis.
<https://orcid.org/0009-0003-9598-9914>

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i5.20084

Palabras clave: Yeso dental tipo IV, polímeros estireno-acrílicos, propiedades mecánicas

[https://www.researchgate.net/publication/396889962 Analisis comparativo de las propiedades del yeso dental tipo IV tradicional frente a mezclas con polimeros estireno-acrilicos en base acuosa/citations#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/396889962_Analisis_comparativo_de_las_propiedades_del_yeso_dental_tipo_IV_tradicional_frente_a_mezclas_con_polimeros_estireno-acrilicos_en_base_acuosa/citations#fullTextFileContent)

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10440467.pdf>