

Efecto Bauschinger en ortodoncia: revisión sistemática de la evidencia disponible en ortodoncia y ciencia de materiales

Bauschinger effect in orthodontics: a systematic review of available evidence in orthodontics and materials science

El Comité Editorial de la revista Ustasalud aprueba la publicación anticipada del presente manuscrito dado que ha culminado el proceso editorial de forma satisfactoria. No obstante, advierte a los lectores que esta versión en PDF es provisional y puede ser modificada al realizar la Corrección de Estilo y la diagramación del documento.

DOI: <http://doi.org/10.15332/us.v24i1.3351>

Publicación en línea: 06/15/2025

Moises Eduardo García Costa¹, Máximo Alcibiades Polonia Garcia¹, Diana Katherine Zolaque Mateus¹, Maria Paula Villarreal Assaf², Luis Alberto López Romero³

¹Odontólogo general, Especialista en Ortodoncia, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: moises.garcia@ustabuca.edu.co

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-0372-9490>

¹Odontólogo general, Especialista en Ortodoncia, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: maximo.polonia@ustabuca.edu.co,

ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-2700-9933>

¹Odontólogo general, Especialista en Ortodoncia, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: diana.zolaque@ustabuca.edu.co,

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-3990-2987>

²Odontólogo general, Especialista en Ortodoncia, Magister en Epidemiología, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: maria.villarreal@ustabuca.edu.co, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9423-4083>

³Enfermero, Magister en Epidemiología, Candidato, Doctorado en Metodología de la Investigación y Salud Pública, Universidad Autónoma de Barcelona (UAB), Barcelona

España. Facultad de Ciencias de la salud, Universidad Autónoma de Bucaramanga (UNAB), Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: llopez470@unab.edu.co. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7698-7900>

Autor de correspondencia

María Paula Villarreal Assaf, Odontóloga general, Especialista en Ortodoncia, Magister en Epidemiología, Universidad Santo Tomás, Departamento de Ortodoncia. Cra. 27 #195-125, Floridablanca, Santander, Colombia. Correo electrónico: maria.villarreal@ustabuca.edu.co

Citación: García Costa ME, Polonia García MA, Zolaque Mateus DK, Villarreal Assaf MP, López Romero LA. Efecto bauschinger en ortodoncia. Revisión sistemática de la evidencia disponible en ortodoncia y ciencia de materiales. *Ustasalud* 2025; 24 (1). <http://doi.org/10.15332/us.v24i1.3351>

Recibido: 12/11/2024. **Aceptado:** 26/01/2025.

Resumen

Introducción: El efecto Bauschinger es crucial en la deformación plástica de metales y es fundamental considerar su impacto para una aplicación efectiva de esta propiedad, en la manipulación de materiales dentales. **Objetivo:** Determinar la evidencia científica disponible hasta el año 2020 sobre el efecto Bauschinger en alambres y aleaciones utilizados en ortodoncia, incluyendo estudios de metalurgia y ciencia de materiales que aporten información transferible al comportamiento mecánico de estos materiales. **Metodología:** Se realizó una revisión sistemática rápida de literatura. Se incluyeron estudios sobre el efecto Bauschinger en ortodoncia, publicados en todos los idiomas en ciencias de los materiales e ingeniería de las diferentes revistas indexadas, bases de datos de ortodoncia y otros repositorios, así como búsqueda en bola de nieve. Se realizó una síntesis cualitativa de la información, y la calidad fue evaluada con la herramienta de evaluación crítica del CEBM. **Resultados:** Se incluyeron 8 artículos publicados entre 1966 y 2020, de los cuales 3 (37,5%) abordaron específicamente el efecto en ortodoncia.

La investigación sobre el efecto Bauschinger en ortodoncia es limitada y no se encuentra ampliamente documentada como en otros campos de la ingeniería y la ciencia de materiales. En el estudio publicado en Australia, los autores resaltaron la relevancia del efecto Bauschinger en alambres de acero inoxidable de calibre 0,016 pulgadas, como un factor con impacto significativo en la deformación plástica y el estrés cíclico en su comportamiento mecánico. **Conclusión:** La literatura del efecto Bauschinger en ortodoncia es limitada, pero sus implicaciones en la selección, diseño y rendimiento de los alambres ortodónticos son significativas. Comprender este efecto, permite optimizar el desempeño clínico de los materiales para un resultado efectivo del tratamiento.

Palabras claves: flexión, resistencia, rigidez, alambres de ortodoncia.

Abstract

Introduction: The Bauschinger effect is crucial in the plastic deformation of metals, and considering its impact is essential for the effective application of this property in the manipulation of dental materials. **Objective:** To determine the available scientific evidence up to the year 2020 on the Bauschinger effect in wires and alloys used in orthodontics, including metallurgy and materials science studies that provide transferable information regarding the mechanical behavior of these materials. **Methodology:** A rapid systematic literature review was conducted. Studies on the Bauschinger effect in orthodontics published in all languages within materials science and engineering from indexed journals, orthodontic databases, other repositories, and snowball searching were included. A qualitative synthesis was performed, and quality was evaluated using the CEBM critical appraisal tool. **Results:** Eight articles published between 1966 and 2020 were included, of which 3 (37.5%) specifically addressed the effect in orthodontics. Research on the Bauschinger effect in orthodontics is limited and not as widely documented as in other fields of engineering and materials science. In a study published in Australia, the authors highlighted the relevance of the Bauschinger effect in 0.016-inch stainless steel wires as a factor with a significant impact on plastic deformation and cyclic stress in their mechanical behavior. **Conclusion:** Literature on the Bauschinger effect in

orthodontics is limited, but its implications for the selection, design, and performance of orthodontic wires are significant. Understanding this effect allows for optimizing the clinical performance of materials for effective treatment outcomes.

Key words: Bending, Strength, Stiffness, Orthodontic wires.

INTRODUCCIÓN

El efecto Bauschinger es un fenómeno crucial en la deformación plástica de los metales, que afecta su resistencia dependiendo de la dirección de la carga y su historia de deformación. En ortodoncia, este efecto es esencial para entender el comportamiento de alambres y brackets bajo cargas cíclicas, ya que un alambre deformado plásticamente, resiste mejor las cargas en la misma dirección de la deformación inicial. Esto influye en el diseño de materiales, que deben soportar cargas repetidas y facilitar con la mayor eficiencia el movimiento dental. En conclusión, comprender el efecto Bauschinger es fundamental para el éxito del tratamiento ortodóntico y requiere más investigación para su aplicación clínica rigurosa (1–3).

La comprensión del efecto Bauschinger en ortodoncia es crucial debido a su influencia en la durabilidad y resistencia de los dobleces y activaciones utilizados en los tratamientos. Al diseñar los elementos de resorte, es esencial considerar cómo el efecto Bauschinger puede afectar su rendimiento, y de esta forma, establecer una disposición adecuada de dobleces, ubicación espacial de helicoides y demás estrategias biomecánicas. Sin embargo, a pesar de su importancia clínica, es un efecto subestimado en la literatura, en el gremio y en la mayoría de las instituciones educativas en ortodoncia, de hecho, en gran parte de los fundamentos académicos, se muestran ejemplos contradictorios a este principio físico y mecánico (4).

A pesar de su relevancia biomecánica, la investigación específica sobre el efecto Bauschinger en ortodoncia es escasa y se concentra principalmente en estudios de las décadas de 1970 a 1980. Esta disminución de interés en los últimos años se explica, en gran medida, por el cambio de paradigma en los materiales y sistemas de fuerzas utilizados clínicamente. El auge de las aleaciones de níquel-titanio (NiTi) superelásticas

y con memoria de forma, que operan predominantemente dentro del rango elástico o superelástico sin deformación plástica permanente, ha reducido la atención sobre fenómenos asociados a la inversión de cargas después de deformaciones plásticas, típicos de los alambres de acero inoxidable. Aunque la literatura específica sobre el efecto Bauschinger en ortodoncia es limitada, sus implicaciones en la selección, diseño y rendimiento de los alambres ortodónticos son significativas (1-5).

El objetivo de esta revisión sistemática rápida es sintetizar la evidencia disponible hasta el año 2020 sobre el efecto Bauschinger en alambres y aleaciones ortodónticas, incluyendo estudios de metalurgia y ciencia de materiales que aporten información relevante.

Pregunta de investigación: ¿Cuál es la evidencia científica disponible hasta el año 2020 sobre el efecto Bauschinger en alambres y aleaciones utilizados en ortodoncia, y qué aportes de la literatura de metalurgia permiten comprender mejor su impacto en el comportamiento mecánico y la aplicación clínica de estos materiales?

Desenlace principal de la revisión: Descripción y síntesis de los hallazgos sobre la presencia, magnitud e implicaciones clínicas del efecto Bauschinger en alambres ortodónticos (principalmente acero inoxidable y NiTi), así como de los mecanismos descritos en la literatura de metalurgia que puedan transferirse a la ortodoncia.

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS Y RECOLECCIÓN DE DATOS:

Se llevó a cabo una revisión sistemática rápida de la literatura en revistas científicas indexadas en bases de datos de ciencias de la salud, ingeniería y ciencia de materiales. Se utilizaron algoritmos de búsqueda específicos adaptados a la sintaxis de cada base de datos. Las bases consultadas fueron PubMed, Biomed Central, Ovid, Embase, EBSCOhost, Science Direct, Google Académico, BVS, ISI, Cochrane Library, LILACS, Scielo, Scirus, Ajodo, Australian Orthodontic Journal y European Journal of Orthodontics.

Los algoritmos de búsqueda según base de datos fueron:

- PubMed/MEDLINE: (“Bauschinger effect” [Title/Abstract] OR Bauschinger [Title/Abstract]) AND (orthodontics[MeSH Terms] OR “orthodontic wires”[MeSH Terms] OR “Stainless Steel”[MeSH Terms] OR Titanium[MeSH Terms] OR “Shape Memory Alloys”[MeSH Terms]).
- Embase/Ovid: (Bauschinger OR “Bauschinger effect”) AND (orthodontics OR “orthodontic wire*” OR “stainless steel” OR titanium OR NiTi).
- ScienceDirect/EBSCOhost: Bauschinger AND (orthodontics OR “orthodontic wires” OR “stainless steel” OR titanium).
- Google Académico / Scielo / LILACS / BVS: (“efecto Bauschinger” OR “Bauschinger effect”) AND (ortodoncia OR “alambres ortodónticos” OR “acero inoxidable” OR titanio)
- Cochrane Library / ISI: Bauschinger AND (orthodontics OR wires OR steel OR titanium).

Además, se complementó con una búsqueda manual mediante el método de “bola de nieve” para identificar artículos adicionales. La búsqueda no tuvo límite inferior de fecha y se extendió hasta el año 2020.

Los criterios de inclusión fueron: artículos originales publicados y disponibles en texto completo, en inglés o español, que abordaran el efecto Bauschinger en alambres o aleaciones ortodónticas, o en materiales metálicos (aceros, aleaciones de titanio, níquel-titanio u otros metales) cuya evidencia fuera transferible al comportamiento mecánico de los alambres utilizados en ortodoncia. Se consideraron los siguientes diseños metodológicos: estudios experimentales in vitro, estudios de laboratorio, revisiones narrativas o sistemáticas, y análisis teóricos o de mecanismos. Se excluyeron resúmenes de congresos, cartas al editor, opiniones de expertos sin base experimental y estudios que no mencionaran el efecto Bauschinger o no tuvieran relación con metales utilizados o potencialmente aplicables en ortodoncia (6, 7).

La extracción fue realizada por dos evaluadores independientes y cegados, utilizando un formato diseñado previamente según el propósito del estudio; los desacuerdos fueron dirimidos por consenso entre los investigadores.

La calidad metodológica y el riesgo de sesgo de los estudios incluidos se evaluaron de forma independiente por dos revisores mediante la herramienta de evaluación crítica del Centre for Evidence-Based Medicine (CEBM) de la Universidad de Oxford. Se aplicó la lista de verificación correspondiente al diseño de cada estudio (estudios experimentales in vitro/laboratorio o revisiones), sin duplicar criterios. Los desacuerdos se resolvieron por consenso (6, 7).

Los aspectos evaluados de forma sistemática en todos los estudios fueron:

- Claridad y pertinencia de la pregunta de investigación.
- Validez de los métodos empleados (diseño experimental, descripción de materiales y procedimientos).
- Adecuación y descripción de la muestra (número de especímenes, tipo de aleación, dimensiones).
- Control de sesgos y reproducibilidad de las condiciones de prueba.
- Precisión y claridad en la presentación de los resultados.
- Aplicabilidad y coherencia de las conclusiones con los hallazgos.

No se utilizó una escala numérica global de puntuación; la evaluación se presentó de forma narrativa y descriptiva por estudio. Se consideró que un estudio “cumplía con todos los criterios” cuando respondía de manera clara y adecuada a todos los ítems anteriores de la lista CEBM correspondiente a su diseño.

Con respecto al análisis de los datos, se elaboraron tablas en Excel para realizar un análisis descriptivo univariado de las características de los estudios incluidos. Las variables categóricas (país de publicación, diseño de estudio, tipo de aleación, área de aplicación del efecto Bauschinger) se presentaron mediante frecuencias absolutas y relativas (porcentajes). Las variables continuas correspondientes a las características de los estudios (por ejemplo, año de publicación) se resumieron mediante promedios cuando fue pertinente.

No se realizó meta-análisis cuantitativo ni agrupación (pooling) de datos de resultados de los diferentes estudios, debido a la elevada heterogeneidad clínica, metodológica y

de resultados (diferentes aleaciones, diseños experimentales, variables de desenlace y contextos de aplicación ortodoncia vs. metalurgia). Por tanto, no se evaluó heterogeneidad estadística (I^2 o pruebas de homogeneidad). En su lugar, se llevó a cabo una síntesis narrativa y cualitativa de los hallazgos, organizando la información según el área de estudio (ortodoncia o metalurgia/ciencia de materiales), tipo de aleación y principales conclusiones de cada investigación (7).

RESULTADOS

En la búsqueda inicial, se identificaron un total de 13,732 artículos relacionados con el tema de estudio en varias bases de datos académicas. Tras eliminar duplicados, se descartaron preliminarmente 11.024 artículos por no cumplir los criterios de inclusión (título y resumen no relacionados con el efecto Bauschinger, ni con alambres o aleaciones ortodónticas, ni con metalurgia relevante). De los 60 artículos revisados en texto completo, se excluyeron aquellos por las siguientes razones: tema no relacionado con el efecto Bauschinger o con materiales de interés para ortodoncia, aquellos que no evaluaban el fenómeno de interés, diseños de publicación no elegible y aquellos sin texto completo disponible. Finalmente, se seleccionaron 8 artículos publicados entre 1966 y 2020. La mayoría correspondió a estudios de metalurgia y ciencia de materiales ($n = 5$; 62,5 %), mientras que 3 estudios (37,5 %) abordaron específicamente el efecto Bauschinger o fenómenos relacionados en alambres ortodónticos (8, 9, 10) (Ver figura 1). Las características de los estudios incluidos se resumen en la tabla 1.

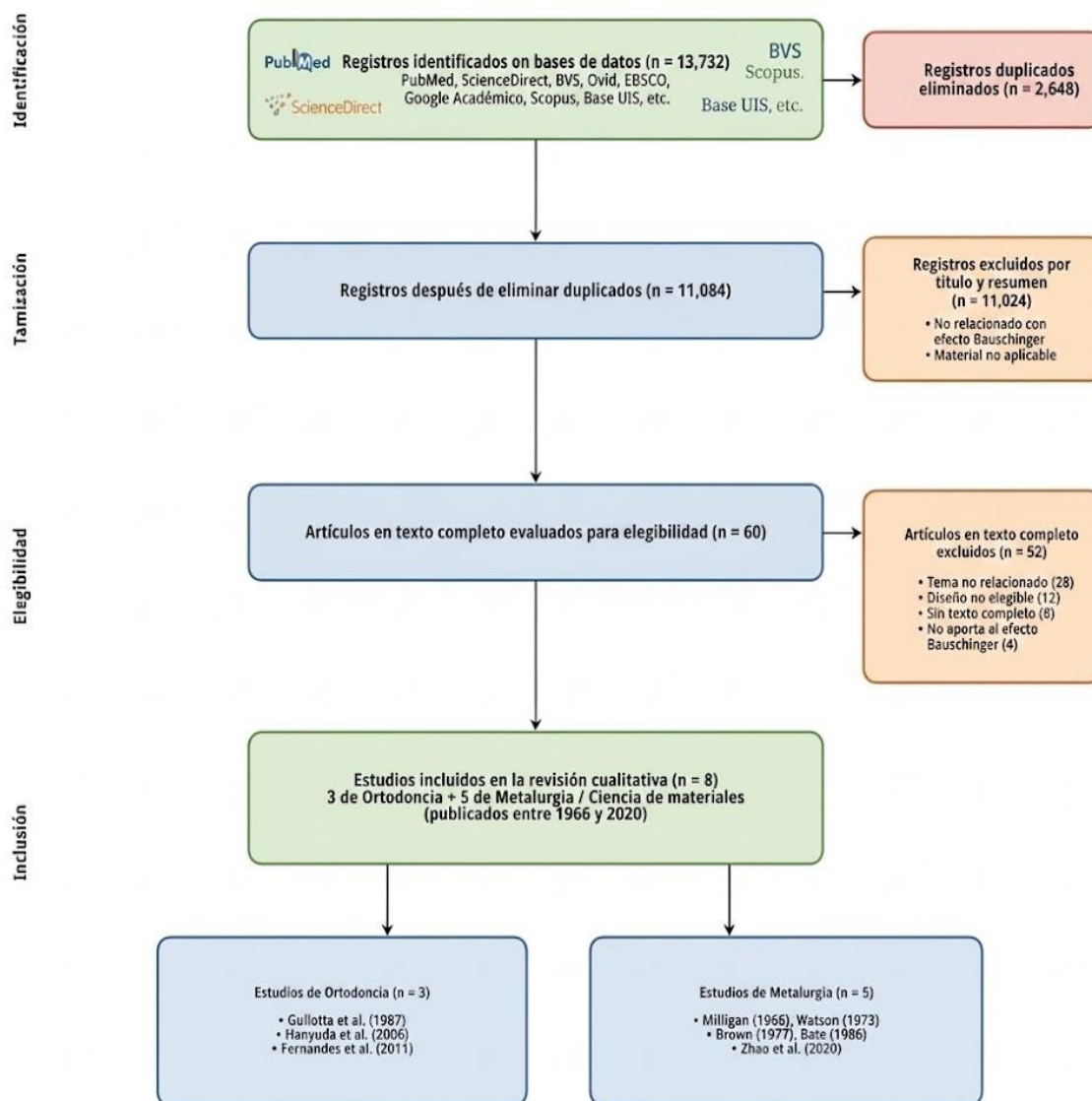
Características descriptivas de los estudios incluidos:

Se incluyeron 8 estudios publicados entre 1966 y 2020 (media del año de publicación: 1991). El 62,5 % ($n = 5$) correspondió a metalurgia o ciencia de materiales y el 37,5 % ($n = 3$) a ortodoncia. El 87,5 % ($n = 7$) fue experimental y el 12,5 % ($n = 1$) teórico. Por país, cuando se reportó: Estados Unidos, Australia, Japón, Brasil y China (un estudio cada uno); en tres artículos de metalurgia no se consignó el país en la fuente recuperada.

Respecto a las aleaciones, el 62,5 % ($n = 5$) evaluó aceros (de alta resistencia, comercial, bajo/alto carbono o austenítico); el 12,5 % ($n = 1$) solo acero inoxidable ortodóntico; el

12,5 % (n = 1) NiTi y acero inoxidable; y el 12,5 % (n = 1) beta-titanio. El 37,5 % (n = 3) aplicó el efecto Bauschinger (o un fenómeno mecánico relacionado) a alambres u ansas de uso clínico; el 62,5 % (n = 5) lo describió en metales de ingeniería, con mecanismos transferibles a ortodoncia. Estas frecuencias corresponden a la Tabla 1.

Figura 1 Selección de artículos (Flujograma PRISMA).



Nota: Se eliminaron los estudios que no evaluaban el efecto Bauschinger o cuya evidencia no era transferible al comportamiento mecánico de alambres ortodónticos.

El efecto Bauschinger en ortodoncia fue abordado en 3 de los 8 artículos incluidos, todos con metodología experimental. Gullotta y colaboradores exploraron el efecto en alambres de acero inoxidable de 0,016 pulgadas de diámetro, por su parte, Hanyuda y colaboradores compararon alambres de NiTi y acero inoxidable mientras que Caldas y colaboradores evaluaron el comportamiento de ansas de beta-titanio preactivadas (8, 9, 10).

De acuerdo con la pregunta de investigación (“¿Cuál es la evidencia científica disponible hasta el año 2020 sobre el efecto Bauschinger en alambres y aleaciones utilizados en ortodoncia, y qué aportes de la literatura de metalurgia permiten comprender mejor su impacto en el comportamiento mecánico y la aplicación clínica de estos materiales?”), se incluyeron finalmente 8 artículos: tres centrados en el ámbito de la ortodoncia (8, 9, 10), y cinco del ámbito de la metalurgia y ciencia de materiales que aportan mecanismos transferibles (3, 11, 12, 13, 14). A continuación, se presentan los hallazgos principales organizados según el área.

Efecto en ortodoncia

En 1987, Gullotta y colaboradores detectaron un fuerte impacto del efecto Bauschinger en alambres ortodónticos de acero inoxidable, especialmente tras deformaciones previas, lo que afectó su capacidad para mantener una fuerza constante durante el tratamiento. Se observaron alteraciones significativas en las propiedades mecánicas tras ciclos de carga y descarga, indicando cambios en la estructura cristalina y una disminución en la capacidad elástica (8).

Por otra parte, Hanyuda y colaboradores concluyeron que los alambres de NiTi no debían deformarse permanentemente, observándose que la curva de descarga coincidía con la de carga, a diferencia de los alambres de acero inoxidable, donde sí se evidenció el efecto Bauschinger. En conjunto con lo anterior, Caldas y colaboradores evaluaron ansas de beta-titanio preactivadas y observaron una reducción progresiva de la fuerza, especialmente crítica en las primeras 24 horas (9, 10). Este comportamiento es coherente con las propiedades mecánicas descritas para los alambres de beta-titanio,

que combinan menor rigidez que el acero inoxidable con buena conformabilidad, pero también relajación de tensiones tras la preactivación (10, 15).

Los principales hallazgos de los estudios incluidos y su relevancia clínica se presentan en la Tabla 2, la evaluación de calidad en la Tabla 3, y una síntesis detallada de cada investigación se presenta en la Tabla 4.

Hallazgos de metalurgia y ciencia de materiales transferibles a ortodoncia:

Los estudios de metalurgia y ciencia de materiales incluidos aportan evidencia sobre los mecanismos fundamentales del efecto Bauschinger que resultan transferibles a la comprensión del comportamiento de los alambres ortodónticos, especialmente aquellos sometidos a deformación plástica previa (doblecés, activaciones o conformado de loops y ansas) (3, 11, 12-14).

En términos generales, se confirma que después de una deformación plástica en una dirección, el límite elástico en la dirección opuesta disminuye de forma significativa (efecto Bauschinger). Este fenómeno se explica principalmente por la redistribución de tensiones internas y por el comportamiento de las dislocaciones: las dislocaciones generadas durante la carga inicial facilitan el movimiento de nuevas dislocaciones cuando se invierte el sentido de la fuerza. La magnitud del efecto depende del grado de predeformación, de la microestructura del material y del tratamiento térmico previo (3, 11, 12, 13, 16).

En aceros de alta resistencia se ha documentado que el efecto Bauschinger se incrementa con la deformación permanente hasta cierto punto y luego se estabiliza (13). Asimismo, en aceros inoxidables austeníticos se observó que a mayor esfuerzo cíclico, mayor es la magnitud del efecto Bauschinger (14). Hallazgos en otras escalas (por ejemplo, nanowires) ilustran el mismo fenómeno (17), aunque no se involucraron en esta revisión. (14, 17).

Estas evidencias resultan clínicamente relevantes para la ortodoncia, ya que los alambres de acero inoxidable y beta-titanio que se doblan o preactivan (loops, ansas en

T, activaciones de cierre de espacios o torque) experimentan una historia de deformación plástica. En consecuencia, su capacidad elástica residual y la magnitud de la fuerza entregada en la dirección opuesta a la deformación inicial pueden reducirse, afectando la predictibilidad de la mecánica. Comprender estos mecanismos permite anticipar cambios en el comportamiento del alambre después de su manipulación clínica y optimizar el diseño de las activaciones (8, 9, 10).

Calidad metodológica

La evaluación de la calidad metodológica de los 8 artículos seleccionados se realizó utilizando la herramienta del CEBM según los criterios descritos en la metodología (claridad de la pregunta, validez de los métodos, adecuación de la muestra, control de sesgos, precisión de resultados y aplicabilidad de las conclusiones). Se encontraron variaciones en la calidad: el estudio de Hanyuda y colaboradores presentó resultados significativos a pesar de la falta de una pregunta de investigación claramente formulada. En contraste, el artículo de Gullotta y colaboradores cumplió con todos los criterios de la lista CEBM, abordando una pregunta definida, utilizando métodos válidos y controlados, y presentando resultados y conclusiones coherentes. Los estudios de metalurgia también mostraron calidad variable, destacando el rigor experimental de Milligan, Bate y Zhao (junto a sus colaboradores) (3, 13, 14). Los resultados de esta evaluación de calidad metodológica se presentan en la Tabla 3.

Tabla 1. Características de los estudios incluidos

Nº	Autor (Año)	País / Revista	Área	Diseño	Aleación estudiada	Muestra
1	Milligan et al. (1966)	EE.UU. / J Basic Eng	Metalurgia	Experimental	Acero 4330	Muestras uniaxiales
2	Watson & Brown (1973)	— / Scripta Metall	Metalurgia	Experimental	Acero comercial	Muestras en torsión
3	Brown (1977)	— / Scripta Metall	Metalurgia	Teórico	Metales en general	—
4	Bate & Wilson (1986)	— / Acta Metall	Metalurgia	Experimental	Aceros bajo/alto C	Muestras de acero
5	Gullotta et al. (1987)	Australia / Aust Orthod J	Ortodoncia	Experimental	Acero inoxidable 0.016"	Alambres redondos
6	Hanyuda et al. (2006)	Japón / Orthod Waves	Ortodoncia	Experimental	NiTi y Acero inoxidable	Alambres 0.016"
7	Caldas et al. (2011)	Brasil / AJODO	Ortodoncia	Experimental	Beta-titanio	90 ansas en T
8	Zhao et al. (2020)	China / J Wuhan Univ	Metalurgia	Experimental	Acero austenítico Mn18Cr18N	Muestras cíclicas

Tabla 2. Principales resultados de los estudios

Estudio	Principal hallazgo relacionado con el efecto Bauschinger	Relevancia clínica para ortodoncia
Gullotta et al. (1987)	Efecto Bauschinger significativo en alambres de acero inoxidable; reduce el potencial elástico.	Alta – impacta el diseño de dobleces y activaciones.
Hanyuda et al. (2006)	Presente en acero inoxidable; ausente (o mínimo) en NiTi.	Alta – justifica el uso de NiTi cuando se busca comportamiento predecible.
Caldas et al. (2011)	Reducción progresiva de fuerza en ansas de beta-titanio preactivadas (crítica en las primeras 24 h).	Alta – afecta la predictibilidad de la mecánica de cierre.
Milligan et al. (1966)	El efecto aumenta hasta ~2% de deformación y luego se estabiliza.	Media – mecanismo transferible.
Watson & Brown (1973)	Gran efecto Bauschinger genera alta tasa de endurecimiento al invertir la carga.	Media.
Brown (1977)	Explicación por dislocaciones (modelo de Orowan).	Media – base teórica.
Bate & Wilson (1986)	Importancia de las tensiones internas residuales.	Media.
Zhao et al. (2020)	A mayor esfuerzo cíclico, mayor magnitud del efecto.	Media – aplicable a acero inoxidable.

Tabla 3. Evaluación de la calidad metodológica (CEBM)

Estudio	Claridad de la pregunta	Validez de métodos	Adecuación de muestra	Control de sesgos	Presentación de resultados	Aplicabilidad de conclusiones	Cumple todos los criterios
Gullotta et al. (1987)	Sí	Sí	Parcial	Sí	Sí	Sí	Sí
Hanyuda et al. (2006)	No	Parcial	Sí	Parcial	Sí	Sí	No
Caldas et al. (2011)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Milligan et al. (1966)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Limitada*	Sí
Watson & Brown (1973)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Limitada*	Sí
Brown (1977)	Sí	— (teórico)	—	—	Sí	Limitada*	Parcial
Bate & Wilson (1986)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Limitada*	Sí
Zhao et al. (2020)	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Limitada*	Sí

* Limitada = no se evaluó en calibres ni en condiciones clínicas de ortodoncia.

Tabla 4. Características y síntesis de los estudios incluidos sobre el efecto Bauschinger en alambres ortodónticos y materiales metálicos relevantes.

Título	Revista	Objetivo	Diseño de estudio	Aleaciones	Muestra / Población	Metodología empleada	Limitaciones	Conclusiones
The Bauschinger Effect in High Strength Steels milligan et al., 1966	J Basic Eng	Evaluar cuantitativamente el efecto Bauschinger en un acero modificado 4330 en función del nivel de resistencia y de la estructura derivada de variaciones en el tratamiento térmico.	Experimental	Acero modificado 4330	Estructuras martensíticas, perlíticas y bainíticas; muestras uniaxiales de tensión-compresión	Pruebas uniaxiales de tensión-compresión en material con diferentes estructuras obtenidas por tratamiento térmico.	No reportadas por los autores. Limitaciones identificadas por los revisores: no se evalúa en alambres de calibre ortodóntico ni en condiciones clínicas.	El efecto Bauschinger aumenta al incrementar la tensión permanente hasta aproximadamente un 2 % y posteriormente permanece constante.
Torsional prestrain and the bauschinger effect in steel Watson et al., 1973	Scripta Metallurgica	Describir observaciones del efecto Bauschinger en acero de refuerzo comercial e interpretar el comportamiento observado.	Experimental	Acero (0,18 % C – 0,87 % Mn)	Muestras de acero comercial sometidas a torsión unidireccional	Torsión unidireccional seguida de refrigeración inmediata y ensayo de tensión en máquina Instron con control de velocidad constante; monitoreo con extensómetro.	No reportadas por los autores. Limitaciones identificadas por los revisores: no se estudia acero inoxidable ortodóntico ni se evalúan condiciones clínicas.	Cuando el efecto Bauschinger es grande, su eliminación o reducción por esfuerzo conduce a un rápido aumento de la tensión de flujo y a una tasa aparente de endurecimiento por trabajo muy alta.
Orowan's explanation of the	Scripta Metallurgica	Aclarar y ampliar la comprensión del efecto	Revisión bibliográfica /	Metales en general	No aplica – revisión de literatura	Análisis teórico basado en la explicación de Orowan y	No reportadas por los autores. Limitaciones identificadas por	La reducción del límite elástico en la dirección inversa se debe a que las

Bauschinger effect Brown et al., 1977		Bauschinger a la luz de trabajos recientes sobre el papel de las dislocaciones.	Análisis teórico			trabajos recientes sobre microestructura y comportamiento de dislocaciones.	los revisores: análisis puramente teórico sin datos experimentales propios ni aplicación a materiales ortodónticos.	dislocaciones que crean obstáculos durante la deformación inicial facilitan el movimiento de nuevas dislocaciones cuando se invierte la carga.
Analysis of the bauschinger effect Bate et al., 1986	Acta Metallurgica	Revisar las teorías del efecto Bauschinger en relación con el papel de las tensiones internas en el endurecimiento o por trabajo.	Experimental	Aceros con bajo y alto contenido de carbono	Muestras de aceros de bajo y alto carbono	Análisis experimental y teórico de las tensiones internas y su relación con el efecto Bauschinger.	No reportadas por los autores. Limitaciones identificadas por los revisores: no se evalúa en alambres de uso ortodóntico.	El efecto Bauschinger es un fenómeno relevante que debe considerarse en el diseño de componentes estructurales para evitar fallos prematuros.
The bauschinger effect in stainless orthodontic wire Gullotta et al., 1987	Australian Orthodontic Journal	Evaluar el efecto de un cambio en la dirección de la carga sobre las propiedades mecánicas de alambres de acero inoxidable ortodónticos.	Experimental	Acero inoxidable	Alambres redondos de acero inoxidable Wilcock de 0,40 mm (0,016"), varios grados, suministrados en carrete	Ensayos de carga y descarga con cambio de dirección en alambres de calibre ortodóntico.	No reportadas por los autores. Limitaciones identificadas por los revisores: se evaluó solo un calibre y no se incluyeron otras aleaciones ortodónticas.	Se produjo un efecto Bauschinger significativo que redujo el potencial elástico del alambre. El ortodoncista puede aprovechar este efecto para optimizar el diseño de la mecánica.
Long-term time effect on load-deflection characteristics of orthodontic wires	Orthodontic Waves	Examinar el efecto del tiempo sobre las características de carga-deflexión de alambres	Experimental	NiTi y acero inoxidable	Alambres ortodónticos de 0,016"	Ensayos de carga-descarga a diferentes tiempos para evaluar coincidencia de curvas y	No reportadas por los autores. Limitaciones identificadas por los revisores: pregunta de investigación poco definida y	En alambres de NiTi la curva de descarga coincidió con la de carga (sin efecto Bauschinger evidente); en acero inoxidable sí se evidenció el efecto.

Hanyuda et al., 2006		ortodónticos de NiTi y acero inoxidable.				presencia del efecto Bauschinger.	descripción incompleta de algunos métodos.	
Effects of stress relaxation in beta-titanium orthodontic loops caldas et al., 2011	America n Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics	Evaluar la caída de carga en el sistema de fuerzas de ansas en T de beta-titanio preactivadas por curvaturas concentradas a lo largo del tiempo.	Experimental	Beta-titanio	90 ansas de beta-titanio preactivadas (9 grupos)	Activación inmediata vs. evaluación a 24 h, 48 h, 72 h, 1, 2, 4, 8 y 12 semanas.	No reportadas por los autores. Limitaciones identificadas por los revisores: no se evaluó directamente el efecto Bauschinger por inversión de carga.	Las ansas preactivadas sufrieron deformación progresiva y reducción de fuerza, especialmente crítica en las primeras 24 horas.
Bauschinger Effect of Mn18Cr18 N Austenitic Stainless Steel Zhao et al., 2020	Journal of Wuhan University of Technology	Estudiar experimentalmente el efecto Bauschinger en acero inoxidable austenítico Mn18Cr18N bajo carga cíclica.	Experimental	Acero inoxidable austenítico Mn18Cr18 N	Muestras del acero Mn18Cr18 N	Análisis cuantitativo de curvas bajo diferentes ciclos y amplitudes de deformación cíclica.	No reportadas por los autores. Limitaciones identificadas por los revisores: no se evalúa en calibres ni condiciones de uso ortodóntico.	Existe efecto Bauschinger bajo carga cíclica; esfuerzos mayores producen un efecto Bauschinger de mayor magnitud.

DISCUSIÓN

La evidencia científica específica sobre el efecto Bauschinger en el ámbito de la ortodoncia es escasa: de los ocho estudios incluidos en esta revisión, solo tres abordaron directamente el fenómeno o fenómenos relacionados en alambres ortodónticos (8, 9, 10). El resto corresponde a investigaciones de metalurgia y ciencia de materiales cuyos hallazgos sobre mecanismos de dislocaciones, tensiones residuales y comportamiento cíclico son transferibles a la comprensión del comportamiento de los alambres de acero inoxidable y beta-titanio aún utilizados en mecánica activa y acabado.

Esta limitada producción científica no implica que el fenómeno haya perdido relevancia en la actualidad; más bien refleja un cambio en las prioridades de investigación. El predominio clínico de los alambres de NiTi y de los sistemas de alineadores ha orientado los esfuerzos hacia la comprensión de fuerzas continuas y ligeras, la predicción del movimiento mediante modelos computacionales y el control del anclaje esquelético. En este escenario, el efecto Bauschinger (estrechamente ligado a la historia de deformación plástica y a la inversión de la dirección de carga) resulta menos visible en los protocolos actuales de alineación inicial y de acabado con aleaciones superelásticas.

No obstante, el efecto conserva una importancia clínica real en las técnicas que todavía utilizan alambres de acero inoxidable o beta-titanio sometidos a dobleces permanentes. Entre estas técnicas se encuentran:

- La confección y activación de loops y ansas (ansas en T, ansas de cierre, loops de verticalización o de torque) en acero inoxidable o beta-titanio.
- La mecánica de cierre de espacios con alambres de acero rectangular preactivados.
- Las activaciones de torque y de control radicular en etapas de acabado.
- El doblado y ajuste de arcos utilitarios, arcos de intrusión o arcos de tip-back (8, 10, 18).

En todas estas situaciones el alambre experimenta una deformación plástica previa. Según la evidencia de metalurgia transferible y los hallazgos de Gullotta y colaboradores (8), esta historia de carga reduce la capacidad elástica residual cuando la fuerza se aplica en sentido contrario a la deformación inicial. En la práctica clínica esto se traduce en una posible disminución de la fuerza entregada y en una menor predictibilidad de la mecánica si el ortodoncista no considera el efecto Bauschinger al diseñar y activar el aditamento (8).

Por lo tanto, comprender este fenómeno sigue siendo útil para optimizar el diseño de los dobleces, decidir el sentido de la preactivación y anticipar la magnitud real de la fuerza que recibirá el diente, especialmente en las etapas de mecánica activa y de acabado donde los alambres de acero y beta-titanio continúan siendo de uso frecuente (8, 10, 18).

Para entender por qué ocurre esta reducción de la capacidad elástica, es necesario recurrir a los estudios de metalurgia. Estos trabajos han demostrado que el efecto Bauschinger se presenta en distintos metales de ingeniería, en particular en aceros de alta resistencia y aceros inoxidable austeníticos, y que su magnitud depende de la predeformación, la microestructura y la historia de carga (3, 11-14, 16). Después del periodo de búsqueda de esta revisión se han descrito mecanismos análogos en otros sistemas; por ejemplo, Deboeuf y colaboradores (2022) lo observaron en suspensiones elasto-plásticas (19). Ese trabajo no formó parte de los ocho estudios incluidos. Así mismo, Zhao y colaboradores confirmaron que, en aceros inoxidable austeníticos, a mayor esfuerzo cíclico mayor es la magnitud del efecto Bauschinger (14).

Estos mecanismos de dislocaciones y tensiones residuales, aunque descritos en contextos de ingeniería, tienen una traslación directa a la ortodoncia. El efecto Bauschinger describe precisamente la tendencia de un material a mostrar una menor resistencia a la deformación cuando se invierte la dirección de la carga después de una deformación plástica previa (16, 20). Los cinco estudios de metalurgia incluidos en esta revisión, junto con revisiones clásicas del fenómeno en metales (16) aportan la base

teórica que permite interpretar el comportamiento mecánico de los alambres de acero inoxidable y beta-titanio utilizados clínicamente (3, 11, 12-14).

Estos hallazgos de metalurgia permiten explicar por qué, tras una deformación plástica previa, el alambre puede disminuir su capacidad elástica cuando la carga se invierte. En ortodoncia, esto afecta la predictibilidad de dobleces, loops, ansas y activaciones de torque en alambres de acero inoxidable y beta-titanio. Las consecuencias prácticas de este fenómeno se reflejan en varios aspectos del tratamiento ortodóntico. En primer lugar, la selección del material y el diseño del arco son críticos, debido a que el acero inoxidable y el beta-titanio responden de manera diferente al efecto Bauschinger en comparación con las aleaciones de NiTi. El diseño del alambre (rectangular o redondo) y el control de la cantidad y dirección de la fuerza aplicada influyen directamente en las deformaciones y en la predictibilidad de la mecánica (15, 18, 20, 21).

En segundo lugar, la reducción de la energía máxima almacenada implica que hay menos energía elástica disponible para mover los dientes, lo que puede disminuir la efectividad del movimiento dental (20, 22). Por otro lado, los cambios en la tasa de fuerza dentro del rango elástico pueden hacer que la fuerza aplicada permanezca más constante a medida que se desvía el alambre, lo que podría mejorar el control del movimiento (15, 22).

Finalmente, el aumento de la ductilidad del alambre tras la predeformación facilita su manipulación clínica, permitiendo al ortodoncista doblarlo o darle forma con mayor precisión y personalizar el tratamiento de cada paciente (9).

En síntesis, aunque la literatura específica en ortodoncia es limitada, el efecto Bauschinger sigue siendo un factor biomecánico relevante en las técnicas que emplean alambres de acero inoxidable y beta-titanio. Su comprensión permite anticipar cambios en la fuerza entregada, optimizar el diseño de las activaciones y tomar decisiones clínicas más fundamentadas.

Como fortaleza principal, esta es una de las primeras revisiones sistemáticas rápidas realizadas sobre las temáticas del efecto Bauschinger en ortodoncia, con total rigurosidad de las fuentes empleadas. Lo anterior, considerando que se llevó a cabo una búsqueda de 13.732 artículos, los cuales incluyeron, además de publicaciones científicas y de ortodoncia, revistas de metalurgia e ingeniería; con un rango de publicación de más de 40 años. Así mismo, se incluyeron todos los países de publicación e idiomas, en las bases de datos.

Una limitación es la escasa literatura de biomateriales en ortodoncia desde las ciencias básicas: solo un trabajo experimental de 1987 evaluó de forma directa el efecto Bauschinger en alambres ortodónticos.

CONCLUSIONES

Se puede concluir que el efecto Bauschinger tiene un impacto relevante en ortodoncia y en la respuesta biomecánica del movimiento dental. Comprender este efecto permite anticipar la efectividad de diversas mecánicas, elegir acertadamente la aleación, la sección transversal y la conformación de los diferentes aditamentos utilizados durante el tratamiento, e integrar las ciencias básicas como evidencia en la toma de decisiones clínicas.

Financiación

Este trabajo fue financiado totalmente por los autores del presente trabajo.

Conflicto de interés

Los autores del presente trabajo manifiestan no tener ningún conflicto de interés

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Xiang Y, Vlassak JJ. Bauschinger effect in thin metal films. *Scr Mater.* 2005;53(2):177-82.
2. Weiss M, Kupke A, Manach PY, Galdos L, Hodgson PD. On the Bauschinger effect in dual phase steel at high levels of strain. *Mater Sci Eng A.* 2015;643:127-36.
3. Bate PS, Wilson DV. Analysis of the Bauschinger effect. *Acta Metall.* 1986;34(6):1097-105.
4. Quinn RS, Yoshikawa DK. A reassessment of force magnitude in orthodontics. *Am J Orthod.* 1985;88(3):252-60.
5. Burstone CJ, Qin B, Morton JY. Chinese NiTi wire—a new orthodontic alloy. *Am J Orthod.* 1985;87(6):445-52.
6. Tapia-Benavente L, Vergara-Merino L, Garegnani LI, Ortiz-Muñoz L, Hernández CL, Vargas-Peirano M. Rapid reviews: definitions and uses. *Medwave.* 2021;21(1):e8090.
7. Garritty C, Gartlehner G, Nussbaumer-Streit B, King VJ, Hamel C, Kamel C, et al. Cochrane Rapid Reviews Methods Group offers evidence-informed guidance to conduct rapid reviews. *J Clin Epidemiol.* 2021;130:13-22.
8. Gullotta A, West VC, Hazel RJ. The Bauschinger effect in stainless steel orthodontic wires. *Aust Orthod J.* 1987;10(2):110-3.
9. Hanyuda A, Nagasaka S, Yoshida T. Long-term time effect on load-deflection characteristics of orthodontic wires. *Orthod Waves.* 2006;65(4):155-60.
10. Caldas SGFR, Martins RP, Viecilli RF, Galvão MR, Martins LP. Effects of stress relaxation in beta-titanium orthodontic loops. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2011;140(2):e85-92.
11. Watson JD, Brown GG. Torsional prestrain and the Bauschinger effect in steel. *Scr Metall.* 1973;7(7):739-43.
12. Brown LM. Orowan's explanation of the Bauschinger effect. *Scr Metall.* 1977;11(2):127-31.

13. Milligan RV, Koo WH, Davidson TE. The Bauschinger effect in a high-strength steel. *J Basic Eng.* 1966;88(2):480-8.
14. Li F, Zhao X, Zhang H, He W, Chen H, Guo H. Bauschinger effect of Mn18Cr18N austenitic stainless steel. *J Wuhan Univ Technol Mater Sci Ed.* 2020;35(2):399-406.
15. Gurgel JA, Pinzan-Vercelino CRM, Powers JM. Mechanical properties of beta-titanium wires. *Angle Orthod.* 2011;81(3):478-83.
16. Sowerby R, Uko DK, Tomita Y. A review of certain aspects of the Bauschinger effect in metals. *Mater Sci Eng.* 1979;41(1):43-58.
17. Bernal RA, Aghaei A, Lee S, Ryu S, Sohn K, Huang J, et al. Intrinsic Bauschinger effect and recoverable plasticity in pentatwinned silver nanowires tested in tension. *Nano Lett.* 2015;15(1):139-46.
18. Thurow RC. *Edgewise orthodontics*. 4th ed. St. Louis: Mosby; 1982.
19. Deboeuf S, Ducloué L, Lenoir N, Ovarlez G, Le Rond d'Alembert J. A mechanism of strain hardening and Bauschinger effect: shear-history-dependent microstructure of elasto-plastic suspensions. *Soft Matter.* 2022;18(46):8733-46.
20. Kapila S, Sachdeva R. Mechanical properties and clinical applications of orthodontic wires. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1989;96(2):100-9.
21. Kusy RP, Whitley JQ. Friction between different wire-bracket configurations and materials. *Semin Orthod.* 1997;3(3):166-77.
22. Burstone CJ, Goldberg AJ. Beta titanium: a new orthodontic alloy. *Am J Orthod.* 1980;77(2):121-32.