

# Patrón de cambio de las propiedades mecánicas de rigidez y superelasticidad de alambres de Nitinol® superelásticos expuestos a reciclado\*

## Pattern of change of the mechanic properties of stiffness and pseudoelasticity of nickel-titanium wires expose to recycling

### Resumen

**ANTECEDENTES:** el Nitinol® superelástico ha sido la aleación de elección utilizada en los alambres de uso ortodóntico en la primera fase de tratamiento. A pesar de sus óptimas cualidades, este alambre es de uso limitado por su alto costo lo cual ha conllevado a que los ortodoncistas se vean motivados a reciclarlo con el fin de compensar su costo en la práctica diaria. **OBJETIVO:** reconocer las alteraciones de las propiedades mecánicas, de rigidez y superelasticidad de los alambres níquel titanio reutilizados y así regular esta práctica en la clínica. **MÉTODOS:** tipo de diseño experimental donde se utilizaron 56 alambres de Nitinol® 0.016" 3M Unitek® que fueron distribuidos aleatoriamente en grupos de esterilización (glutaraldehído y calor seco). Inicialmente se evaluó la rigidez en su condición original (T0) por medio de la prueba flexión y tensión, y posteriormente fueron sometidos a cuatro ciclos de reciclaje. El análisis de los resultados fue realizado con la prueba t de Bonferroni ( $P > 0.005$ ) y el ANOVA de dos vías ( $p > 0.05$ ). **RESULTADOS:** durante la esterilización con frío se observó una tendencia al aumento del valor de rigidez, mientras lo contrario fue evidente al esterilizar con calor seco. La superelasticidad mostró en ambos grupos de esterilización una tendencia al aumento hasta T3. **CONCLUSIONES:** clínicamente no hay efectos significativos de la esterilización sobre los alambres.

**Palabras clave:** alambre Nitinol® superelásticos, rigidez, curva carga deformación, martensítica, austenítica, reciclado.

**Área temática:** biomecánica en ortodoncia

### Abstract

**BACKGROUND:** Nitinol® superelastic wires have been the primary allegiance used in orthodontic wires during the first phase of treatment. Despite it's qualities, these wires are of limited use because of it's high cost, which has motivated orthodontic professionals to sterilize this material with the purpose of reducing the cost of the daily practice. **OBJECTIVE:** recognize the alterations of the biomechanical properties of stiffness and super elasticity of reused nickel titanium wires and therefore regulate this practice in the clinical environment. **METHODS:** experimental type design where 56 0.016" Nitinol® lower arch wires from 3M Unitek® were randomly distributed in two sterilization groups (Glutaraldehyde and dry heat). Initially the stiffness of the wires was evaluated in their original conditions (T0) throughout tests of deformation and tension. Afterwards the wires were submitted to four cycles of recycling. The results were analyzed by the Bonferroni t test ( $P < 0.005$ ) and the ANOVA double way variance analysis ( $p < 0.05$ ). **RESULTS:** during sterilization with glutaraldehyde a tendency was observed towards greater stiffness, whereas the contrary was observed with the wires sterilized with dry heat. Superelasticity showed a tendency to increase in both sterilization groups up to T3. There were also higher values of superelasticity for wires sterilized with dry heat. **CONCLUSIONS:** clinically there are no significant effects upon the wires when sterilized.

**Key words:** superflexible Nitinol® wires, stiffness, force / deformation curves, martensitic, austenitic, recycling.

**Thematic field:** biomechanic in orthodontics

- **Victoria Eugenia Charris Benedetti**  
Odontóloga, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, D. C., Colombia. Ortodoncista, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, D. C., Colombia. vcydh@hotmail.com
- **Esther Marina Cotes García**  
Odontóloga, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, D. C., Colombia. Ortodoncista, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, D. C., Colombia. emcotes@yahoo.com
- **Marco Aurelio Pardo Silva**  
Odontólogo, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D. C., Colombia. Ortodoncista, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia. Director posgrado de ortodoncia. Universidad de El Bosque. Bogotá, D. C., Colombia. Presidente de la sociedad colombiana de ortodoncia. Bogotá, D. C., Colombia. Profesor asistente. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, D. C., Colombia. Director del trabajo. mapardos@cablenet.com.co

Recibido para publicación:  
2 de diciembre de 2003

Aceptado para publicación:  
junio de 2005

\* Artículo correspondiente al trabajo de grado para optar al título de especialista en ortodoncia.



### Introducción

Con la aparición de nuevas aleaciones de níquel-titanio, el mercado de los materiales en ortodoncia ha sufrido una revolución. Características como excelente resiliencia, menor rigidez y una mayor capacidad de deflexión, le han conferido a este material una elasticidad superior. Como consecuencia, es posible disponer de un alambre resistente a la deformación permanente, permitiéndole asimismo volver a su forma original luego de ser usado clínicamente, mientras que mantiene una gran capacidad de almacenamiento de energía.<sup>1-4</sup>

Buckthal (1986) publicó que cerca del 52% de los clínicos que usan alambre de níquel-titanio lo reciclan siendo el alto costo de este material la razón más común para justificar esta conducta. Cerca del 55% de los clínicos que reciclaron estos materiales se mostraron preocupados ante el deterioro de las propiedades mecánicas de estos alambres mientras que el 20% fueron indiferentes ante este aspecto.<sup>5</sup>

Cuando se considera el reciclado de alambres de ortodoncia es importante evaluar el efecto que tiene sobre las propiedades físicas del alambre, el tipo de esterilización empleada.

Buckthal y Kusy (1988) plantearon que las soluciones químicas para desinfectar o esterilizar arcos de alambre de níquel-titanio, no comprometen las propiedades elásticas ni la superficie topográfica de dichos materiales, adicionalmente concluyeron que luego de cualquier procedimiento de esterilización las fuerzas entregadas y las fuerzas tensiles resultaron estar en el mismo rango de valores que el grupo control que no fue sometido a ningún procedimiento, es decir, que luego de la desinfección química no hay alteración de las propiedades tensiles ni del almacenamiento de fuerza del alambre.<sup>6</sup>

Mayhew y Kusy (1988) estudiaron sobre alambres de nitinol y titalal y encontraron que al exponerlos a tres ciclos de esterilización con calor, éstos no presentaron un efecto deletéreo en su módulo elástico, en la topografía de su superficie, ni en sus propiedades tensiles.<sup>7</sup>

Kapila y colaboradores (1991) plantearon que el reciclado clínico combinado con la esterilización en frío, altera las características carga-deflexión y la topografía de la superficie de alambres de níquel-titanio, luego de ser expuestos a dos ciclos de reciclado.<sup>8</sup>

Posteriormente, Kapila y colaboradores (1992) concluyeron que luego de someter alambres de níquel-titanio a dos ciclos de reciclaje clínico, se redujeron su pseudoplasticidad y pseudoelasticidad. Adicionalmente se incrementó la rigidez tanto de los alambres Niti como de los Nitinol.<sup>9</sup>

La pseudoplasticidad es la propiedad de demostrar una única curva de carga no lineal al ser sometidos a una fuerza, lo cual significa que un arco de alambre ejerce aproximadamente la misma fuerza cuando se deflexiona a una distancia pequeña o a una grande, y se comporta de la misma manera durante procedimientos de remoción de carga.<sup>10,11</sup>

Dado que los estudios anteriores no han sometido los alambres a mayor deformación y debido a que no han superado tres ciclos de reciclaje, la presente investigación tiene como objetivo describir las alteraciones de las propiedades mecánicas de rigidez y de superelasticidad de los alambres níquel-titanio, mediante el uso de una prueba de flexión y tensión luego de cuatro ciclos de reciclado, con el fin de identificar la técnica de esterilización más adecuada que prolongue la vida útil del alambre.

### Materiales y métodos

El tipo de diseño de la presente investigación fue experimental. Se utilizaron 56 alambres de Nitinol® superelásticos 0.016” 3M Unitek, aleatoriamente distribuidos en dos grupos de 28 cada uno. Un grupo se esterilizó con calor seco y el otro con glutaraldehído.

La prueba fue realizada siguiendo los siguientes pasos: los alambres de Nitinol® 3M Unitek, arcos inferiores preformados de 0.016” supe-relásticos, fueron sometidos a una prueba que mezcla tensión y deformación, similar a la de doblaje de tres puntos de Miura; primero en su condición original, es decir, como los entrega el fabricante (T0),

lo cual correspondió a los valores control con los cuales se compararon los cambios de rigidez y superelasticidad luego de cada ciclo de reciclado (T1, T2, T3, T4). Los ciclos de reciclado consistieron en una fase de esterilización seguida por una fase de alineación y nivelación que se describirá más adelante con mayor detalle.

### Prueba de flexión y tensión

Para la realización de dicha prueba se fabricó un aditamento en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, que consta de un segmento superior en el cual se hallan dos vigas metálicas, a las cuales se les realizó una ranura que alberga el alambre durante la prueba (figura 1a). El aparato también consta de un segmento inferior (figura 1b); que contiene una viga central, diseñada con el mismo diámetro de las vigas del segmento superior para permitir el paso de ésta entre el espacio que separa horizontalmente las 2 superiores. Esta viga, a medida que la presión de la prensa aumenta se desplaza hacia arriba, contactando el alambre y deformándolo una cantidad de 20 mm, medida que corresponde al rango estandarizado de todo el procedimiento indicada por el deformímetro de la prensa, aditamento que mide la deformación vertical del alambre en mm. La viga inferior a su vez está relacionada con un medidor de carga el cual se utiliza para medir la resistencia en gramos.



Figura 1a. Segmento superior del aparato para realizar prueba de flexión y tensión, (A)=vigas.

Para la prueba de flexión y tensión se adaptaron los alambres a las ranuras superiores fijándolos con los tornillos en la parte inferior de las vigas. Luego, se adaptaron las 2 partes del aparato al soporte superior e inferior de la prensa, respectivamente. Posteriormente, se revisó que el dial de carga al igual que el deformímetro estuvieran en cero (0). Después se cargó la prensa de manera que ésta ejerciera la presión que comienza a mover la unidad inferior hacia arriba y se realizó una precarga del alambre, es decir, se deformó aproximadamente 1 mm, y a partir de aquí, se volvió a colocar en cero (0) el dial de carga para comenzar a registrar los valores dados en carga cada 0,127 mm hasta producir una deformación de 5 mm. Luego se descargó cada alambre registrando la fuerza cada 0,254 mm. Estos valores fueron registrados en sus respectivas tablas, cuya unidad de medida corresponde a resistencia. Esta prueba fue realizada por el experto encargado de la prensa del laboratorio de ingeniería civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

### Fase de ligado

Posteriormente los alambres fueron utilizados para la alineación y nivelación en modelos de acrílico, con un apiñamiento anterior estandarizado de 7 mm, durante un período de tres semanas. El apiñamiento fue creado previamente en un tipodonto y reproducido mediante impresiones y vaciado en acrílico transparente. Después a estos modelos se

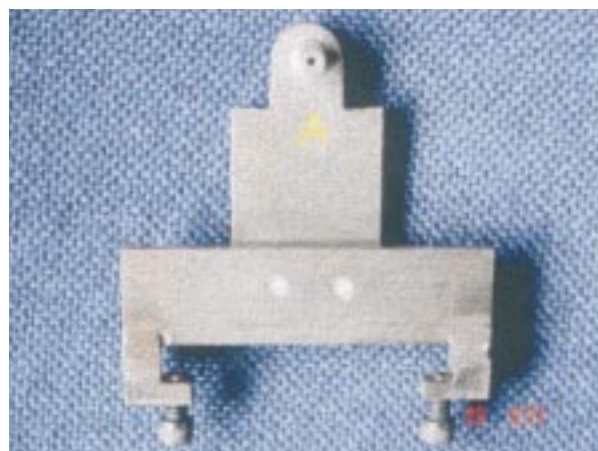


Figura 1b. Segmento inferior del aparato para realizar prueba de flexión y tensión, (A)=viga.

les pegaron brackets estándar de la casa comercial 3M®. Los alambres fueron ligados en los brackets de los modelos de acrílico, con ligadura metálica con la finalidad de lograr la mejor adaptación del alambre en la ranura del bracket. Este procedimiento fue realizado por un solo operador.

### Remoción de los alambres de los modelos

A continuación, los alambres fueron retirados del modelo, lavados con una solución de alcohol isopropílico al 70% y limpiados con gasas, tal como fue hecho en otros estudios. De igual manera, fueron secados teniendo la precaución de no deformar el alambre.<sup>5</sup>

### Clasificación de los alambres

Los alambres fueron clasificados en un principio al azar para la esterilización con frío o calor y luego fueron marcados con un número y con el tipo de esterilización al que fueron expuestos para continuar con dicho protocolo hasta terminar los 4 ciclos de reciclado.

### Esterilización en frío

Los alambres que fueron esterilizados con frío, fueron introducidos en un recipiente con una solución de glutaraldehído ácido al 2% (Glutarex, 3M® corp; Miniápolis, Minn.) por diez horas, tal como recomienda la Asociación Dental Americana.<sup>12-13</sup> Luego fueron retirados de la solución, lavados y secados con gasas estériles y colocados en el modelo de acrílico nuevamente hasta completar otro ciclo.

### Esterilización con calor seco

Los veintiocho alambres restantes, luego de ser retirados del modelo y lavados con alcohol isopropílico al 70%, fueron sometidos a esterilización con calor a una temperatura de 235°C por veinte minutos, de los cuales en los primeros cinco minutos la temperatura presenta un rango entre 203 y 217°C y luego durante los ocho minutos siguientes, la temperatura desciende de 203 a 26°C.

Con el propósito de estandarizar el procedimiento de esterilización, el recipiente de esteriliza-

ción de los alambres siempre fue ubicado en la parte más posterior, inferior e izquierda de un esterilizador de calor seco Dentronix® DDS 5000.

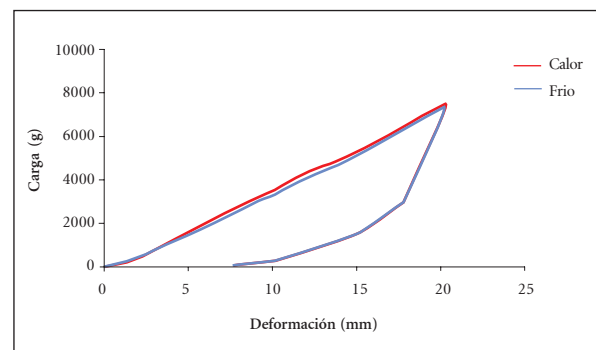
Estos ciclos se repitieron cuatro veces para todas las muestras. Posterior a cada ciclo los alambres fueron analizados con una prueba de flexión y tensión, y revisados para corrosión.

Para el análisis de los resultados se corrió una prueba de ANOVA de dos vías para cada tipo de esterilización usada y para cada ciclo de esterilización. Luego se usó la prueba t de Bonferroni donde se compararon los cuatro ciclos de reciclado y la condición original de los alambres (T0) para determinar si las variables presentaban diferencias significativas en cuanto a rigidez y superelasticidad.

## Resultados

### Estadística descriptiva

Las curvas promedio de tensión-deformación de los 56 alambres en cada ciclo de reciclado (T0-T4) estudiados en esta investigación, se muestran en la gráfica 1.



Gráfica 1. Curva de tensión deformación promedio en T0 para los grupos que serán esterilizados en frío y calor n=52.

El comportamiento de los alambres en todos los grupos (T0 a T4), es similar a las gráficas típicas de tensión-deformación para los alambres de níquel-titanio.<sup>15</sup> Las gráficas presentan una pendiente de carga cercana a la linealidad y dos zonas definidas de descarga, la primera de las cuales corresponde a la fase de baja rigidez descrita en la

literatura (fase martensítica de baja rigidez) y la segunda a la fase de transformación de martensita a austenita. Para las condiciones del experimento no se observó la zona final de alta rigidez en descarga.

### Comparación de los ciclos de esterilización en frío y calor.

#### Estadio inicial (T0)

Los valores promedio correspondientes a la curva de tensión-deformación en T0, hacen referencia a aquellos valores resultantes de la prueba de los alambres sin ser usados, es decir, tal como fueron recibidos del fabricante. Entre el promedio de los valores de la pendiente de carga y las de descarga de los alambres que aleatoriamente fueron clasificados en el grupo de esterilización con frío y calor no se encontraron diferencias estadísticamente significativas (tabla 1).

#### Primer ciclo de reciclado (T1)

Luego del primer ciclo de esterilización los alambres no mostraron diferencias estadísticamente significativas en ninguna de sus fases de carga y descarga, aunque los valores para el grupo de este-

rilización con calor fueron ligeramente mayores (tabla 2).

#### Segundo ciclo de reciclado (T2)

En esta etapa el promedio de los valores de las pendientes de carga muestran un mayor valor para los alambres esterilizados con calor; sin embargo, la diferencia no fue estadísticamente significativa. Lo mismo se observó durante la etapa martensítica de baja rigidez, pero durante la fase de transformación de martensita a austenita, fue evidente un mayor promedio de los valores de la pendiente para los alambres esterilizados en frío. Ninguno de estos hallazgos fue estadísticamente significativo (tabla 3).

#### Tercer ciclo de reciclado (T3)

Durante el tercer ciclo de reciclado los promedios de los valores de la pendiente de carga fueron mayores en el grupo de alambres esterilizados con frío que aquellos del grupo de esterilización con calor. Igualmente, durante la fase martensítica de baja rigidez y la de transformación, los promedios de los valores de las pendientes mostraron un comportamiento similar al descrito anteriormente. Es decir, que durante estas fases los alambres esterili-

**Tabla 1**  
Valores promedio de pendientes indicativas de rigidez en las fases de carga y descarga para todos los ciclos y condiciones de esterilización n=52

		Fase de Carga		Fase martensítica		Fase de transformación	
		Promedio	D.E.*	Promedio	D.E.*	Promedio	D.E.*
Frío	T(0)	346,060	21,850	1728,000	179,740	286,980	21,620
	T(1)	292,440	27,750	1458,800	289,170	248,350	46,790
	T(2)	320,260	37,000	1633,880	278,280	235,150	20,800
	T(3)	371,810	24,340	2004,600	229,740	251,360	33,600
	T(4)	351,750	32,140	1723,800	199,850	278,700	35,380
Calor	T(0)	353,710	22,650	1763,670	101,650	283,820	9,625
	T(1)	331,260	47,220	1506,780	295,340	263,950	44,800
	T(2)	324,180	35,680	1692,000	236,750	222,100	32,670
	T(3)	349,000	22,620	1892,130	192,430	245,680	38,280
	T(4)	305,210	47,300	1422,790	288,350	247,860	34,330

\* D.E. Desviación estándar



**Tabla 2**

**Prueba t de Bonferroni para la pendiente de carga y las de descarga para esterilización con calor y frío (p<0.005)**

Promedio comparados		Carga	Fase martensítica	Fase de transformación
Calor	T0 vs T1	0,053	0,001*	0,035
	T0 vs T2	0,002*	0,202	0,000*
	T0 vs T3	0,499	0,009	0,000*
	T0 vs T4	0,000*	0,000*	0,000*
	T1 vs T2	0,578	0,027	0,001*
	T1 vs T3	0,121	0,000*	0,153
	T1 vs T4	0,074	0,345	0,189
	T2 vs T3	0,009	0,004*	0,019
	T2 vs T4	0,141	0,016	0,006
T3 vs T4	0,000*	0,000*	0,843	
Frío	T0 vs T1	0,000*	0,000*	0,000*
	T0 vs T2	0,003*	0,147	0,000*
	T0 vs T3	0,000*	0,000*	0,000*
	T0 vs T4	0,450	0,937	0,300
	T1 vs T2	0,003*	0,027	0,188
	T1 vs T3	0,000*	0,000*	0,787
	T1 vs T4	0,000*	0,000*	0,010
	T2 vs T3	0,000*	0,000*	0,038
	T2 vs T4	0,002*	0,179	0,000*
T3 vs T4	0,013	0,000*	0,005	

\* Estadísticamente significativo

**Tabla 1**

**ANOVA de dos vías para pendiente de carga, fase martensítica y fase de transformación (p<0.05)**

Fuente de variación	D.C.*	G.L.**	S.C.***	F****	P*****
<b>Carga</b>					
Entre calor y frío	311762,00	1,00	311762,00	153,75	0,000*****
Entre ciclos	6131112,00	4,00	1532778,00	20,60	0,000*****
Interacción	56640,00	4,00	14160,00	6,98	0,000*****
Residual	486656,00	240,00	2027,70		
Total	938357,00	249,00			
<b>Fase martensítica</b>					
Entre filas calor y frío	9496181,00	1,00	9496181,00	128,00	0,000*****
Entre ciclos	6131112,00	4,00	1532778,00	20,60	0,000*****
Interacción	1236340,00	4,00	309085,00	4,16	0,003*****
Residual	17833164,00	240,00	74305,00		
Total	34696797,00	249,00			
<b>Fase de Transformación</b>					
Entre calor y frío	214435,00	1,00	214435,00	140,20	0,000*****
Entre ciclos	82449,00	4,00	20612,00	13,47	0,000*****
Interacción	13840,00	4,00	3460,00	2,26	0,063
Residual	367141,00	240,00	2529,70		
Total	677865,00	249,00			

\* D.C. Diferencia de cuadrados.

\*\* G.L. Grados de libertad.

\*\*\* S.C. Suma de cuadrados

\*\*\*\* F Parámetros de elasticidad de Fischer.

\*\*\*\*\* P Significancia.

\*\*\*\*\* Estadísticamente significativo.

zados con calor presentaron valores más bajos. Ninguno de estos hallazgos fue estadísticamente no significativo tal como se evidencia en la tabla 4.

**Tabla 4**  
Promedio de superelasticidad para alambres esterilizados con frío y calor. Prueba t de Bonferroni ( $p < 0.05$ )  $n = 52$

Calor	T0	T1	T2	T3	T4
Promedio	6,270	7,210	7,400	8,130	5,600
D.E.*	0,550	1,960	0,660	1,830	1,210
<b>Frio</b>					
Promedio	6,100	6,200	7,000	8,100	6,300
D.E.*	1,000	2,300	1,130	1,590	1,220
P**	0,264	0,605	0,128	0,952	0,048

- \* D.E. Desviación estándar.
- \*\* P Significancia.
- \*\*\* Estadísticamente significativo.

### Cuarto ciclo de reciclado (T4)

En esta etapa es evidente que durante la curva de carga hay un valor mayor para los promedios de la pendiente en los alambres esterilizados con frío; sin embargo, este dato no fue estadísticamente significativo. Igualmente, durante las curvas de descarga se mantuvieron las mismas observaciones, las cuales tampoco fueron estadísticamente significativas como se observa en la tabla 5.

**Tabla 5**  
Comparación de los promedios de superelasticidad. Prueba t de Bonferroni ( $p < 0.005$ )

Calor	P	Frio	P
T0 vs T1	0,346	T0 vs T1	0,000*
T0 vs T2	0,000*	T0 vs T2	0,806
T0 vs T3	0,000*	T0 vs T3	0,004*
T0 vs T4	0,057	T0 vs T4	0,000*
T1 vs T2	0,001*	T1 vs T2	0,488
T1 vs T3	0,000*	T1 vs T3	0,140
T1 vs T4	0,769	T1 vs T4	0,001*
T2 vs T3	0,187	T2 vs T3	0,857
T2 vs T4	0,000*	T2 vs T4	0,003*
T3 vs T4	0,346	T3 vs T4	0,042

- \* Estadísticamente significativo.

### Comparación de los valores promedio de la pendiente de carga y de las pendientes de descarga en todos los ciclos y condiciones de esterilización

Para comparar los valores indicativos de la rigidez, entre los ciclos de reciclado y tipo de esterilización (frío y calor), se construyó la tabla 1. La gráfica 1, además de los valores promedio, presenta la línea de tendencia. Se construyó sólo con el fin de comparar los valores a partir de la condición inicial (T0).

La tabla 1 muestra que los valores promedio de la pendiente de carga de los alambres esterilizados con calor disminuyen a medida que aumenta el número de ciclos de reciclado, excepto en T3 donde aún no sobrepasa al de T0. Lo contrario es observado en el comportamiento de los alambres esterilizados con frío donde los promedios de la pendiente de carga a través de los ciclos (T0-T4) muestran gran variabilidad con una tendencia al aumento.

En relación con los promedios de la pendiente de carga de los alambres esterilizados con calor para cada ciclo de reciclado se trazó una línea de tendencia que muestra una disminución de los promedios a medida que aumenta el número de ciclos. Los promedios correspondientes a T2 y T4 muestran diferencias estadísticamente significativas con respecto a T0.

Los promedios de la pendiente de carga de los alambres esterilizados con frío muestran un aumento en cada ciclo a medida que éstos avanzan, lo cual es evidente en la línea de tendencia trazada. Los promedios correspondientes a T1, T2 y T3 muestran diferencias estadísticamente significativas con respecto a T0.

Durante la fase martensítica de baja rigidez, la línea de tendencia de los promedios para cada ciclo de reciclado de los alambres esterilizados con calor, muestra una disminución a medida que aumenta el número de ciclos. Los promedios correspondientes a T1 y T4 presentan diferencias estadísticamente significativas con respecto a T0.

La línea de tendencia trazada con respecto a los promedios de la pendiente de descarga de la fase martensítica de baja rigidez de los alambres esterilizados con frío muestra un aumento a medida que aumentan los ciclos de reciclado. Los promedios de T1 y T3 muestran diferencias estadísticamente significativas con respecto a T0.

Los promedios de la pendiente de la fase de transformación en relación a cada ciclo de reciclado donde se esterilizó con calor muestran una tendencia a la disminución al ser comparados con los promedios en T0. Los promedios que mostraron diferencias estadísticamente significativas con relación a T0 fueron T2, T3 y T4.

En relación a los promedios de la pendiente de descarga de la fase de transformación de martensita a austenita de los alambres esterilizados con frío para cada ciclo de reciclado, se trazó una línea de tendencia que indica una disminución de los promedios a medida que aumenta el número de ciclos. Los promedios correspondientes a T1, T2 y T3 muestran diferencias estadísticamente significativas con respecto a T0.

Otras combinaciones de los ciclos de reciclado del grupo esterilizado con calor mostraron que sólo cinco de éstas fueron estadísticamente significativas, las cuales corresponden a T3 vs T4 en la fase de carga, T1 vs T3, T2 vs T3 y T3 vs T4 en la fase martensítica de baja rigidez y T1 vs T2 en la fase de transformación (tabla 2).

Durante la esterilización con frío todas las posibles combinaciones fueron estadísticamente significativas, excepto T3 vs T4 en la fase de carga, T1 vs T2 y T2 vs T3 en la fase martensítica y T1 vs T2, T1 vs T3, T1 vs T4, T2 vs T3, y T3 vs T4 para la fase de transformación de martensita a austenita (tabla 2).

### ANOVA de dos vías para la pendiente de carga

Es evidente que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tipos de esterilización, los ciclos y la interacción entre frío y calor y ciclos (tabla 3).

### ANOVA de dos vías de la pendiente de descarga fase martensítica de baja rigidez

Las variaciones entre la esterilización con frío y calor, entre ciclos e igualmente su interacción mostraron ser estadísticamente significativas al realizar el ANOVA (tabla 3).

### ANOVA de dos vías de la pendiente de descarga fase de transformación de martensita a austenita

La variación entre esterilización con frío y calor, entre ciclos durante la fase de transformación de martensita a austenita fue estadísticamente significativa, mientras que la interacción entre los ciclos y el tipo de esterilización no fue estadísticamente significativa ( $p=0,0063$ ) (tabla 3).

### Superelasticidad

La superelasticidad es una característica que presentan algunas aleaciones de níquel titanio mediante la cual, en la fase de descarga, entregan niveles de fuerza con muy poca variación en distancias relativamente grandes. En el presente estudio se detectó el inicio de la fase de superelasticidad pero, como se advirtió al principio, no se detectó la fase final denominada austenítica de alta rigidez. Por este motivo se asumió que la fase de transformación terminaba con el final de la curva de descarga. Para medir la superelasticidad, se empleó el método sugerido por Segner e Ibe (1994) y Meling y colaboradores (1998), que consiste en la relación entre la pendiente de la fase martensítica de baja rigidez y la pendiente de la fase de transformación de martensita a austenita.<sup>14-15</sup>

Los promedios de superelasticidad mostraron un aumento constante durante los ciclos de reciclado tanto en el grupo de esterilización con calor como en el grupo de esterilización con frío. No obstante, estos valores no fueron estadísticamente significativos en ningún ciclo ( $p>0.005$ ) (tabla 4).

Al comparar los valores de los promedios de superelasticidad en cada ciclo de reciclado se encontró que durante la esterilización con calor las diferencias fueron de significancia estadística para



T0 y T2, T0 y T3, T1 y T2, T1 y T3, T2 y T4, T3 y T4. Para los alambres esterilizados en frío fueron T0 y T2, T0 y T3, T1 y T3, T2 y T3, T3 y T4 (tabla 5).

Al análisis de varianza de dos vías (ANOVA), la variación de los promedios de superelasticidad entre ciclos y entre frío y calor resultaron ser estadísticamente significativas con  $p=0,00$ . Sin embargo, la interacción entre el tipo de esterilización (calor-frío) y los ciclos de reciclado (T0-T4) no fue estadísticamente significativa ( $p=0,43$ ) (tabla 6).

### Discusión

Debido a sus extraordinarias propiedades, los alambres elaborados a partir de aleaciones de níquel titanio, se han usado cada vez más desde su introducción.<sup>16</sup> Sin embargo, su alto costo ha llevado a los profesionales a reciclarlo. Aunque en el pasado se han estudiado sus propiedades luego de uno o dos ciclos de reciclado, no se conoce el comportamiento de sus propiedades a lo largo de un mayor número de ciclos.

Este estudio analizó 56 alambres de níquel titanio en una prueba que mezcla flexión y tensión. Debido a las características de la prueba, si bien es posible sugerir que inicialmente los alambres están siendo sometidos a esfuerzo flexionante, durante una parte, quizá más importante, el esfuerzo es tensionante aunque el diseño experimental no permite discriminar los límites de los dos

tipos de esfuerzos. Del comportamiento general de los alambres permite asumir que no existe motivo para pensar que la combinación de flexión y tensión hacen inaplicables las conclusiones.

Debido a que en la presente investigación se hicieron cuatro ciclos de reciclado entre los cuales los alambres fueron ligados a un modelo construido con una maloclusión convencional, al final de los ciclos se había reconstruido *in vitro* una condición de uso de alrededor de cuatro meses que se asemeja a la condición del estudio de Stagger y Morgenson (1993),<sup>17</sup> y duplica en tiempos convencionales a los reportados en la literatura.

Las curvas obtenidas constan de una fase inicial de carga que corresponde clínicamente a la activación del alambre, y un segmento de descarga que provee información sobre las fuerzas asociadas con el comportamiento clínico.

No se encontraron diferencias significativas entre los alambres que fueron dispuestos aleatoriamente en los dos grupos (esterilización con calor y frío) durante la prueba inicial (T0), debido a que pertenecían todos al mismo lote de producción y fueron probados tal como los entrega el fabricante.

Al exponer los alambres a los diferentes tipos de esterilización (glutaraldehído y calor seco) durante el período de carga, no se esperaba encontrar efecto alguno sobre la rigidez de los alambres. No obstante, fue evidente una tendencia de los

Tabla 6  
ANOVA de dos vías de la superelasticidad

Fuente de variación	D.C.*	G.L.**	S.C.***	F****	P*****
Entre filas calor y frío	86,550	1,000	86,550	48,100	0,000*****
Entre ciclos	162,900	4,000	40,730	22,620	0,000*****
Interacción	6,950	4,000	1,740	0,960	0,430
Residual	432,400	240,000	1,800		
Total	688,800	249,000			

\* D.C. Diferencia de cuadrados.

\*\* G.L. Grados de libertad.

\*\*\* S.C. Suma de cuadrados

\*\*\*\* F Parámetros de elasticidad de Fischer.

\*\*\*\*\* P Significancia.

\*\*\*\*\* Estadísticamente significativo.

alambres a ser más rígidos cuando se esterilizaron con frío y a ser menos rígidos a medida que eran esterilizados con calor. Sin embargo, las líneas de tendencia de los promedios muestran valores muy pequeños. Esto sugiere que es confiable esterilizar los alambres durante varios ciclos sin alterar significativamente sus propiedades.

Buckthal y Kusy (1988) encontraron que luego de diez horas de procesos de desinfección con tres tipos de líquidos esterilizantes aprobados por la ADA (Asociación Dental Americana) y posterior a 3 ciclos de reciclado ni las propiedades elásticas ni la topografía del alambre se veían afectados. De igual manera, el estudio de Mayhew y Kusy (1988) describió los efectos de tres métodos de esterilización con calor. Al utilizar calor seco, vapor de formaldehído y autoclave y luego de tres ciclos de esterilización, los alambres de nitinol y titalanal no presentaron ningún cambio en detrimento de las propiedades mecánicas o de la topografía de la superficie.<sup>6-7</sup>

Igualmente, Smith, Von Fraunhofer y Casey (1992)<sup>8</sup> en su estudio expusieron alambres de Nitinol<sup>®</sup>, betatitanio y acero inoxidable a tres tipos de esterilización con calor húmedo, calor seco y con esterilizantes líquidos. Observaron que no hubo diferencias clínicas en cuanto al tipo de esterilización usado en pruebas tensiles y carga deflexión. Estos resultados sugieren que los arcos de níquel titanio pueden ser reciclados al menos una vez.<sup>18</sup>

Kapila y colaboradores (1991) estudiaron alambres de Nitinol<sup>®</sup> sujetos a uno o dos ciclos de reciclaje y esterilizados con glutaraldehído al 2%. Observaron diferencias estadísticamente significativas durante la carga al comparar los alambres con los del grupo control. Sin embargo, la fuerza de descarga asociada con estos alambres no parece ser afectada por el reciclaje.<sup>8</sup>

En cuanto al número de ciclos de reciclado y la comparación de los promedios en descarga, los hallazgos de la presente investigación mostraron que no existen efectos significativos sobre la rigidez de los alambres al ser esterilizados durante varios ciclos. Los valores de rigidez al ser fluctuantes y no significativos sugieren que no hay efectos

deletéreos cuando se someten a dicho procedimiento. Sin embargo, al comparar la variación de estos promedios por medio del ANOVA, las diferencias sí fueron significativas. Esto muestra que a medida que los alambres son esterilizados se ven más afectados.

Por el contrario Stagers y Margeson (1993), probaron los efectos de cinco ciclos de reciclado sobre alambres Sentalloy<sup>®</sup> de la casa comercial GAC<sup>®</sup>. Probaron los alambres durante los períodos de T0, T1 y T5 luego de utilizar calor seco, autoclave y óxido de etileno. Concluyeron que no hay diferencias significativas al esterilizar uno o cinco veces el alambre. Kapila y colaboradores (1992) describen que a medida que aumentan los ciclos de esterilización los alambres se vuelven más rígidos tal como lo indica el aumento en la pendiente de la gráfica de fuerza-deformación, donde el máximo cambio observado en la curva de carga fue entre los ciclos T0 y T2 con un incremento en la fuerza aplicada. Sin embargo, planteó en su estudio que las variaciones de los cambios de la rigidez fue pequeña sugiriendo una significancia clínica cuestionable.<sup>17, 9</sup>

La superelasticidad, característica de algunos alambres de níquel titanio, es expresada gráficamente como una zona horizontal o plateau en la región de descarga de la curva de carga/deformación de estos alambres. Reportes recientes han mostrado que alambres de níquel titanio superelásticos no siempre exhiben mesetas de descarga claramente identificables cuando son probados en curvas de carga/deformación.<sup>19-20</sup>

En la presente investigación surgieron características en las curvas de descarga similares a las mencionadas, y por lo tanto, la fase de transformación de martensita a austenita se tomó como la zona en la curva donde había un cambio en la dirección de la pendiente, es decir, donde comenzaba a volverse más horizontal. Sin embargo, durante las pendientes de descarga, las gráficas de los promedios obtenidos no mostraron la fase austenítica de alta rigidez. Por tal motivo, la superelasticidad fue calculada en este estudio mediante la relación de las pendientes que corresponden a la fase martensítica de baja rigidez y la fase de transformación de martensita a austenita. En relación a lo

anterior, Meling y Odegaard (1998) definieron la presencia de superelasticidad como una proporción de estas pendientes mayor a 8 y una “tendencia superelástica” como una proporción entre 2 y 8.<sup>14-15</sup> De acuerdo con esta observación y para las condiciones del presente estudio, los alambres de nitinol® Unitek 3M superelásticos muestran una “tendencia a la superelasticidad” en todos los ciclos de esterilización excepto en T3.

En cuanto al tipo de esterilización utilizada (frío-calor) la superelasticidad mostró una tendencia al aumento, situación que se cumplió a lo largo de todos los ciclos excepto en T4 donde el valor de superelasticidad disminuyó. Estos resultados fueron estadísticamente significativos tanto al comparar los promedios como al comparar la variación de los mismos. Esto sugiere que los alambres al ser esterilizados aumentan su superelasticidad, y por ende, son más efectivos para realizar fuerzas constantes durante el movimiento dental, sólo hasta el tercer ciclo de esterilización. Al comparar el comportamiento de la superelasticidad en los alambres esterilizados con frío y con calor es evidente que presentan diferencias estadísticamente significativas en cuanto a esta variable. Por tanto, se puede afirmar que al esterilizar los alambres con calor seco, se presenta una mayor superelasticidad lo cual es más favorable en el tratamiento.

Kapila, Haugen y Watanabe (1992) observaron que los alambres luego de cada ciclo se volvían más rígidos, lo cual era demostrado por el aumento de la pendiente de la gráfica. Por el contrario, establecen que a pesar de encontrar una disminución en la superelasticidad los alambres de níquel titanio reciclados parecen retener características favorables de carga-deflexión al ser comparados con alambres de acero inoxidable y cromo-cobalto.<sup>9</sup>

A pesar de que los hallazgos de esta investigación mostraron diferencias estadísticamente significativas en relación con el tipo de esterilización utilizada y el número de ciclos a los cuales fueron

expuestos los alambres, todos los valores de las tablas muestran cambios mínimos. Por lo tanto, se puede afirmar que clínicamente no es significativo ya que desde el punto de salud pública la esterilización puede ser un buen recurso para los alambres.

## Conclusiones

Dentro de los hallazgos significativos del estudio, los alambres de níquel titanio al ser esterilizados y reutilizados no presentan una influencia definida sobre los valores de las pendientes de carga y descarga, por tanto, no se puede afirmar que haya un efecto claro sobre las propiedades de los alambres al ser reciclados.

Los alambres al ser esterilizados aumentan su superelasticidad, y por ende, son más efectivos para realizar fuerzas constantes durante el movimiento dental, sólo hasta el tercer ciclo de esterilización.

Durante la etapa de carga, los alambres del grupo de esterilización con calor tienden a ser más rígidos que aquellos del grupo de esterilización con frío; no obstante, a medida que avanzan los ciclos de reciclaje esta diferencia entre los grupos de esterilización con frío y calor disminuye, para luego invertirse. Esto muestra que los alambres esterilizados con calor tienden a disminuir los valores de rigidez a medida que aumentan los ciclos, mientras que aquellos esterilizados con frío, se comportan contrariamente, es decir, aumentan sus valores de rigidez.

Durante las fases de descarga de la curva de tensión-deformación se observó que en la fase martensítica de baja rigidez, los alambres esterilizados con calor mostraron un promedio mayor que los esterilizados con frío, esta relación se invirtió durante los ciclos de T3 y T4 sugiriendo que a medida que aumentan los ciclos de reciclado y al haber una menor rigidez durante estos últimos, los alambres esterilizados con calor son más eficientes para el movimiento dental.

Por el contrario, durante la fase de transformación de martensítica a austenítica, hubo promedios mayores para los alambres esterilizados con frío, lo cual sugiere que es más aconsejable esterilizar los alambres con calor seco para así mantener una baja rigidez de los mismos durante esta fase de la curva de descarga, la cual es la que entrega fuer-

zas constantes haciendo más eficiente el movimiento dental.

La superelasticidad puede ser favorecida por el reciclado de los alambres hasta el tercer ciclo, ya que se observa una clara tendencia a aumentar cuando los alambres son reutilizados hasta tres veces. No hay influencia del tipo de esterilización sobre esta propiedad de los alambres.

Clínicamente, los resultados arrojados por esta investigación no tienen aplicabilidad alguna, debido a que *in vivo* no es factible calcular en qué momento se expresa la zona de transformación de martensítica a austenítica, en la cual teóricamente se entrega una fuerza constante que favorece el movimiento dental eficiente.

### Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados encontrados en la presente investigación, se recomienda realizar el mismo tipo de prueba con otras marcas comerciales con el fin de comparar el comportamiento superelástico de estos alambres entre sí.

De igual manera se sugiere observar el comportamiento de la superelasticidad con diferentes temperaturas que se asemejan a los cambios que hay en cavidad oral durante la ingesta de alimentos.

### Bibliografía

1. Andreasen GF, Morrow RE. Laboratory and clinical analyses of nitinol wire. *Am J Orthod* 1978; 73: 142-51
2. López I, Goldberg J, Burstone CJ. Bending characteristics of nitinol wires. *Am J Orthod* 1979; 75(5): 569-75
3. Drake S, Wayne D, Powers J, Asgar K. Mechanical properties of orthodontic wires in tension, bending, and torsion. *Am J Orthod* Sept 1982; 3: 206-10
4. Kapila S, Sachdeva R. Mechanical properties and clinical applications of orthodontic wires. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1989; 96: 100-9.
5. Buckthal JE, Mayhew MJ, Kusy RP, Crawford JJ. Survey of sterilization and disinfection procedures. *J Clin Orthod* 1986; 20: 759-65.
6. Buckthal JE, Kusy RP. Effects of cold disinfectants on the mechanical properties and surface topography of nickel-titanium arch wires. *Am J Orthod Dentofac-Orthop* 1988; 94: 117-22
7. Mayhew MJ, Kusy RP. Effect of sterilization on the mechanical properties and surface topography of nickel-titanium arch wires. *Am J Orthod Dentofac-Orthop* 1988; 93(3): 232-6.
8. Kapila S, Reichhold G, Anderson S, Watanabe L. Effects of clinical recycling on mechanical properties of nickel-titanium alloy wires. *Am J Orthod Dentofac-Orthop* 1991; 100: 428-35.
9. Kapila S, Haugen J, Watabe L. Load-deflection characteristics of nickel-titanium alloy wire after clinical recycling and dry heat sterilization. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1992; 102: 120-6.
10. Miura F, Mogi M, Okamoto Y. New application of superelastic NiTi rectangular wire. *J Clin Orthod* 1990; 24: 544-8
11. Waters NE. Superelastic nickel-titanium wires. *Br J Orthod* 1992; 19: 319-22
12. Crawford JJ. State of the art: practical infection control in dentistry. *J Am Dent Assoc* 1985; 110: 629-33
13. Sánchez Y, Quiceno L, Aceveco MM. Manual de asepsia y bioseguridad de odontología. Departamento de Recursos Humanos del Instituto de Seguros Sociales, 1995
14. Segner D, Ibe D. Superelastic materials displaying different force levels within one archwire. *J Orofac Orthop* 1998; 59: 29-38
15. Meling T, Odegaard J. The effect of temperature in the elastic responses to longitudinal torsion of rectangular nickel titanium arch wires. *Angel orthodontist* 1998; 4: 357-68
16. Miura F, Mogi M, Ohura Y, Hamanaka H. The super-elastic properties of the Japanese NiTi alloy wire of use in orthodontics. *AJODO* 1986; 90: 1-10.
17. Stagers JA, Margeson D. The effects of sterilization on the tensile strength of orthodontic wires. *Angle Orthod* 1993; 2: 141-4
18. Smith G, Fraunhofer VY, Cassey G. The effects of clinical sterilization on selected orthodontic arch wires, *AJODO* 1992; 102: 153-9.
19. Tonner RI, Waters NE. The characteristics of superelastic Ni-Ti wires in tree - point bending. Part I: The effect of temperature. *Eur J Orthod* 1994; 16: 409-19
20. Segner D, Ibe D. Properties of superelastic wires and their relevancy to orthodontic treatment. *Eur J Orthod* 1995; 17: 395-402.

### Agradecimientos

Al personal de los laboratorios de ingeniería civil de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C., por su disposición y colaboración en la elaboración de las pruebas del presente trabajo.