

ENDURECIMIENTO CON EXPLOSIVOS DE CRUZAMIENTOS DE VÍA: PROCESO RIOMETAL DE MAXAM

Javier Carrillo de Albornoz Portes

Ingeniero de minas, MAXAM International, Spain

Ignacio Fernández de Miguel

Ingeniero de minas, MAXAM International, Spain

Andrés Gudín Böller

Ingeniero de minas, MAXAM International, Spain

RESUMEN

Una de las piezas críticas de desgaste de la red ferroviaria es el corazón de los cruzamientos, un elemento sometido a mayores esfuerzos que las vías. Para su construcción suele emplearse acero Hadfield, con una dureza “de fábrica” en torno a 220 HBW.

MAXAM, líder europeo en la fabricación de material explosivo y sistemas de iniciación para uso civil (minería, túneles, canteras...), ha desarrollado un proceso de endurecimiento de estas piezas que permite aumentar su dureza por encima de 350-400 HBW, antes de su suministro e instalación, mediante el disparo de una carga explosiva especialmente diseñada denominada RIOMETAL.

Con esta dureza, el cruzamiento aumenta de manera notable su resistencia al desgaste, lo que implica una reducción aproximada de los costes de mantenimiento del 50%, una extensión de su vida útil de alrededor del 40% y una disminución del Coste del Ciclo de Vida (LCC) de un 20% aproximadamente, reduciéndose también el número y duración de las paradas para reparaciones, recargas de material y sustituciones.



Figura 1. Cruzamiento ferroviario

1. EL ACERO HADFIELD Y SU APLICACIÓN EN VÍAS FERROVIARIAS

Un desvío ferroviario es una construcción especial que permite a los trenes cambiar de una vía a otra para modificar su dirección. La parte fundamental de cada desvío es cruzamiento, a través del cual las vías se cruzan para luego separarse definitivamente en dos direcciones diferentes.

Dentro del cruzamiento, el elemento de mayor desgaste es el denominado corazón, donde se materializa la separación de ambas vías. El material más adecuado para la producción estos corazones es el acero austenítico al manganeso: acero Hadfield.

1.1 El acero Hadfield

El acero Hadfield es un acero austenítico al manganeso en el que la transformación martensítica de endurecimiento ha sido suprimida por una combinación de alto contenido en manganeso y carbono, y la precipitación de carburos por una alta velocidad de enfriamiento desde la temperatura de austenización.

El material es unifásico y presenta una estructura austenítica capaz de elevar su dureza desde 180 hasta 900 Brinell sin presentar transformación martensítica. Este material posee una incomparable capacidad de endurecimiento por deformación plástica y una alta resistencia a la tracción y a la compresión.

Por ello, es utilizado cuando se requiere resistencia al impacto y contra la abrasión, como en los campos del movimiento de tierra y minería (trituradoras, molinos, dientes de pala), la perforación de pozos, la siderurgia o la industria ferroviaria.

Sin embargo, es difícil de mecanizar, por lo que no son aptos para piezas que requieran alta precisión o que deban resistir la deformación plástica durante su servicio.

1.2 Cruzamientos ferroviarios

En los cruzamientos ferroviarios se emplea el acero Hadfield porque es capaz de endurecer su superficie de trabajo (es decir, aumentar su dureza superficial) bajo la presión y carga de choque que producen las ruedas de ferrocarril circulando sobre él.

Sin embargo, en los primeros ciclos de uso, puede sufrir un alto desgaste debido a que este proceso de endurecimiento no se ha producido aún.

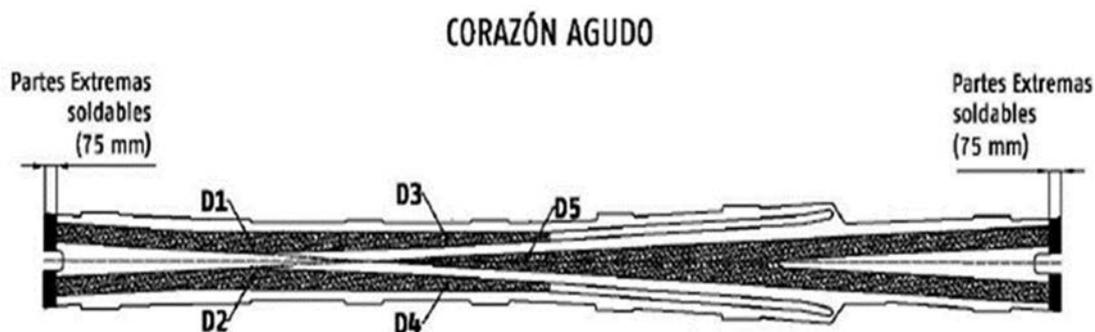


Figura 2. Ejemplo de un corazón de cruzamiento y zonas de pre-endurecimiento

Cuando los corazones de los cruzamientos se emplean sin endurecimiento previo pueden experimentar una deformación y un desgaste de unos 3 mm en las primeras semanas de servicio, hasta que logran alcanzar una dureza suficiente para minimizar este desgaste.

Este endurecimiento “natural” se produce por efecto de la deformación plástica que causan las propias cargas de operación (los trenes al pasar) sobre el acero austenítico al manganeso.

Para alargar la vida útil de los aparatos, reducir el coste de mantenimiento (recarga de material, sustitución) y optimizar su coste del ciclo de vida (LCC), los principales operadores ferroviarios especifican que, en sus vías férreas, los corazones de sus cruzamientos deben tener las bandas de rodadura endurecidas previamente a su instalación.

1.3 Pre-endurecimientos con explosivos

El proceso de endurecimiento previo a su colocación en la red ferroviaria más habitual es el endurecimiento con explosivos, patentado por primera vez en 1955.

Esta tecnología se fundamenta en la importante deformación plástica que sufre el acero al verse sometido a la onda de presión producida por la detonación del material explosivo, que aumenta drásticamente su dureza superficial.

El proceso de endurecimiento de aceros austeníticos con explosivos consiste en adherir una carga detonante a la zona de la pieza que se pretende endurecer (banda de rodadura) y hacerla detonar.

Con una sola detonación se pueden alcanzar valores de dureza Brinell superiores a 350 hasta una profundidad de unos 20 mm bajo la superficie de rodadura. Para alcanzar mayores durezas (>450 HBW), este proceso puede repetirse varias veces, normalmente hasta un máximo de 3.

Los principales operadores ferroviarios han establecido normas y criterios que incluyen los requisitos de dureza superficial y profundidad requeridos para los cruzamientos que han pasado por un proceso de pre-endurecimiento.

La Tabla 1 muestra, a modo de resumen, algunos ejemplos de requisitos exigidos en diferentes normas y regiones.

The validity of the standard	Standard	Hardness after explosive hardening (HBW)	The explosive application depth Z (mm)	Length of hardening area L	Surface hardness test locations
<i>The European Union</i>	EN 15689	321	10	100%	3, 4, 5
<i>Switzerland</i>	SBB 10-028-C3	321	14	100%	3, 4, 5
<i>North America</i>	AREMA 100-08	352	15,9	100%	1 to 7
<i>Australia</i>	ETA-03-03	350-415	20	100%	1 to 7

Tabla 1. Requisitos de dureza tras pre-endurecimiento según diversas normas

2. PROCESO RIOMETAL PARA PRE-ENDURECIMIENTO CON EXPLOSIVOS.

MAXAM ha desarrollado un proceso de endurecimiento de los corazones de los cruzamientos, utilizando para ello un explosivo específicamente patentado denominado RIOMETAL. Esta técnica se realiza en una instalación especialmente acondicionada en la planta de la Compañía en Páramo de Masa (Burgos).

Por este proceso han pasado, tan sólo en 2020, más de 1.100 corazones de cruzamientos producidos por los principales fabricantes europeos (Amurrio Ferrocarril y Equipos, JEZ sistemas ferroviarios, Mieres Rail, Vossloh Cogifer, Outreau Technologies...) que han sido instalados en líneas de alta velocidad, metros, ferrocarriles mineros y líneas convencionales y de mercancías de Europa, África y América.

Al tratarse de una aplicación de material explosivo, debe llevarse a cabo por personal autorizado y en un área acondicionada y autorizada para ello. En el caso de MAXAM, se realiza por artilleros de la propia compañía y bajo supervisión del departamento técnico, en el campo de tiro que hay dentro de sus instalaciones de Burgos.

2.1 Características técnicas de las láminas explosivas de RIOMETAL

Para el endurecimiento de la superficie de las piezas de acero, MAXAM emplea un explosivo laminado en bandas denominado RIOMETAL, formado por una base de pentrita muy fina embebida en una matriz plastificante.

El producto lleva una banda adhesiva que le permite adherirse a la superficie de la pieza que se quiera endurecer.

Este producto lo fabrica MAXAM para todo el mundo en su fábrica de Páramo de Masa (Burgos).



Figura 3. Láminas de RIOMETAL

Las características técnicas del RIOMETAL son las siguientes:

- Espesores de lámina: de 2 a 6 mm
- Ancho de lámina: Hasta 1.000 mm
- Longitud de banda: 10 m
- Velocidad de detonación: 6.500 m/s
- Clasificación UN: UN 0084, clase 1.1 D

Como todos los explosivos que comercializa MAXAM y en cumplimiento de la legislación vigente y del Reglamento de Explosivos, cada caja de RIOMETAL tiene su propio código de trazabilidad y, dentro de la caja, cada plantilla específica de su interior dispone de un código único de trazabilidad. Gracias a ello, podemos realizar el seguimiento de calidad en cada una de las piezas endurecidas.

2.2 Características del lugar de trabajo de los endurecimientos

Un factor fundamental para realizar este proceso es disponer de un lugar adecuado donde realizarlo, que deberá contar con su autorización correspondiente y, dado que se trata de hacer detonar explosivos al aire, deberá cumplir con los siguientes requisitos:

- Que el lugar esté alejado de zonas habitadas para evitar que la onda aérea cause molestias o daños.
- Que esté vallado y sin posibilidad de acceso de personas ajenas a la actividad
- Que cuente con un acceso adecuado para la entrada de los camiones de transporte de las piezas y los elementos de descarga (grúa)

- Que la superficie sobre la que se realiza el endurecimiento y su entorno esté limpio de cualquier elemento que pueda arder, como vegetación o embalajes, para evitar el riesgo de incendio, y contar con un sistema de extinción de incendios de seguridad.
- Deberá contar con plataformas para la colocación de las vías que permitan su perfecta nivelación y soporten el impacto de la detonación.



Figura 4. Vista general del campo de tiro de MAXAM en Páramo de Masa (Burgos)

2.3 Procedimiento operativo

Cada pieza que se pretende endurecer se identifica con un código y se diseña específicamente para ella la plantilla de explosivo que va a necesitar por medio de un programa de diseño gráfico.

A continuación, se recortan dichas plantillas a partir de los bloques de RIOMETAL que se almacenan en los depósitos de seguridad con los que cuenta MAXAM en sus instalaciones de Páramo de Masa y se les coloca la lámina adhesiva y el código de trazabilidad único y específico. Una vez está completo el lote, se embalan en cajas que, a su vez, se codifican para tener un control completo del producto explosivo que se va a utilizar en cada operación.

El día de disparo, se trasladan las cajas hasta el campo de tiro y se custodian por un vigilante de seguridad autorizado hasta que se produce su colocación y disparo.

Mientras, las piezas procedentes de la fundición son recepcionadas, identificadas, descargadas y posicionadas, prestando especial atención a su asentamiento en la cama de arena de la zona de disparo, para asegurar que la fuerza del impacto se transmita de manera homogénea a la pieza.



Figura 5. Plantilla de RIOMETAL recortada y colocación en cruzamiento

Ya posicionadas, se revisan las piezas para detectar posibles anomalías y se limpian las superficies de contacto para proceder a la colocación del explosivo específico de cada pieza, que previamente fue recortado a medida. Esta labor la realizan artilleros especializados de MAXAM, bajo supervisión de su departamento técnico y cumpliendo con los protocolos establecidos.

Una vez finalizada la colocación de los explosivos y los sistemas de iniciación, se revisa la instalación, se asegura el perímetro de seguridad, se abandona la zona y comienza el procedimiento de disparo con la comprobación del circuito de voladura, la conexión del explosor en la caseta de disparo, la verificación final de que la zona está totalmente despejada y, si todo está bien, la detonación del explosivo en uno o más disparos secuenciados.

A continuación, los artilleros regresan al campo para comprobar que todo el explosivo ha detonado y que se puede retornar con seguridad. Cuando es así, se revisan de nuevo las piezas, se comprueban las durezas resultantes en los puntos de control de cada pieza con un durómetro portátil, se toman fotografías, que podrán formar parte del informe final de calidad, y se elabora el certificado de dureza específico.

Finalmente, se procede a la carga del material endurecido en el camión para enviarlo de vuelta a su fábrica de origen, donde será revisado de nuevo y rectificado si es necesario.



Figura 6. Secuencia de disparo

3. RESULTADOS DEL PROCESO

A lo largo de los años, MAXAM ha trabajado en el endurecimiento de más de 3.000 aparatos de ferrocarril para diferentes fabricantes internacionales.

A continuación, se recoge el estudio de los resultados obtenidos en las 1.398 piezas que endureció con el proceso RIOMETAL en sus cruzamientos de vías entre junio de 2015 y agosto de 2019.

Para ello, se recopilaron las durezas medidas y registradas en los informes de calidad en tres puntos de cada pieza: corazón, pata 1 y pata 2.

Durezas HBW	Punta	Pata 1	Pata 2	Pieza
Medio	367	361	363	364
Máximo	474	460	465	474
Mínimo	321	322	322	321
Percentil 10%	399	390	390	394
Percentil 99,5%	324	325	325	325

Tabla 2. Resumen resultados 1.398 piezas

La conclusión fue que, en las 1.398 piezas analizadas, se alcanzó un valor promedio de dureza de 364 HBW, con un 10% de las medidas superando, incluso los 394 HBW y el 99,5% de las medidas superando los 324 HBW.

Los resultados obtenidos se pueden ver resumidos en las siguiente tablas y gráficas que recogen los resultados obtenidos en las diferentes piezas:

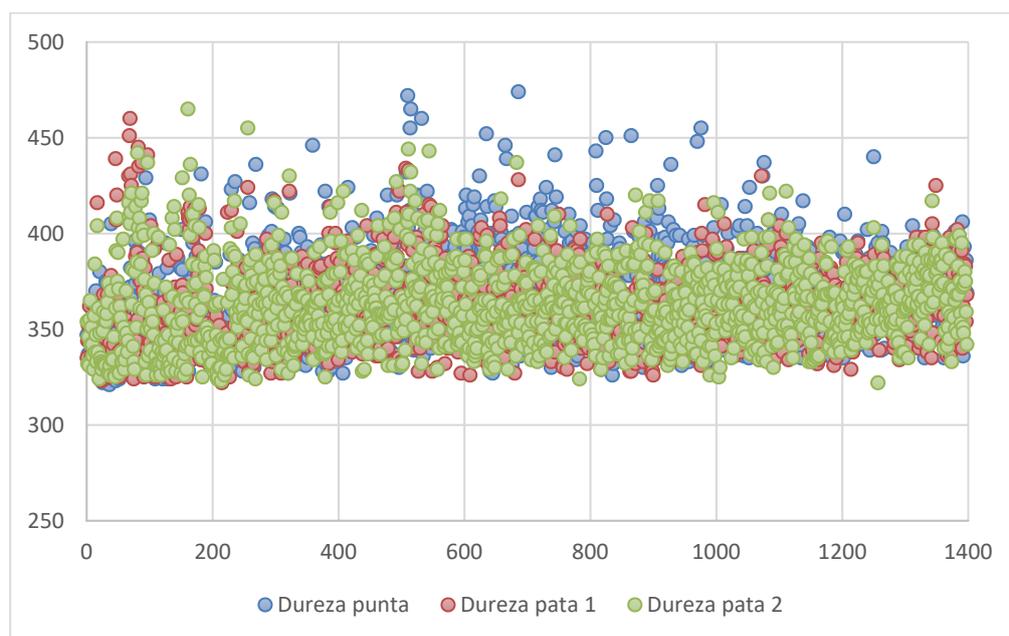


Figura 7. Resumen de resultados de dureza Brinell en punta y patas de cruzamientos

4. EJEMPLOS EXPERIMENTALES

Como ejemplos prácticos, incluimos en este artículo dos procesos de endurecimiento con una y con dos detonaciones llevados a cabo por MAXAM en 2020.

Los trabajos en campo fueron realizados por un equipo compuesto por un ingeniero, como Director Facultativo y responsable de la operación, y 2 artilleros, todos con una amplia experiencia en esta aplicación, que contaron con el apoyo externo del departamento técnico de MAXAM (TAP).

4.1 Caso 1: Endurecimiento con una detonación

Se trataba de 5 cruzamientos soldables de corazón agudo fabricados en acero Hadfield.

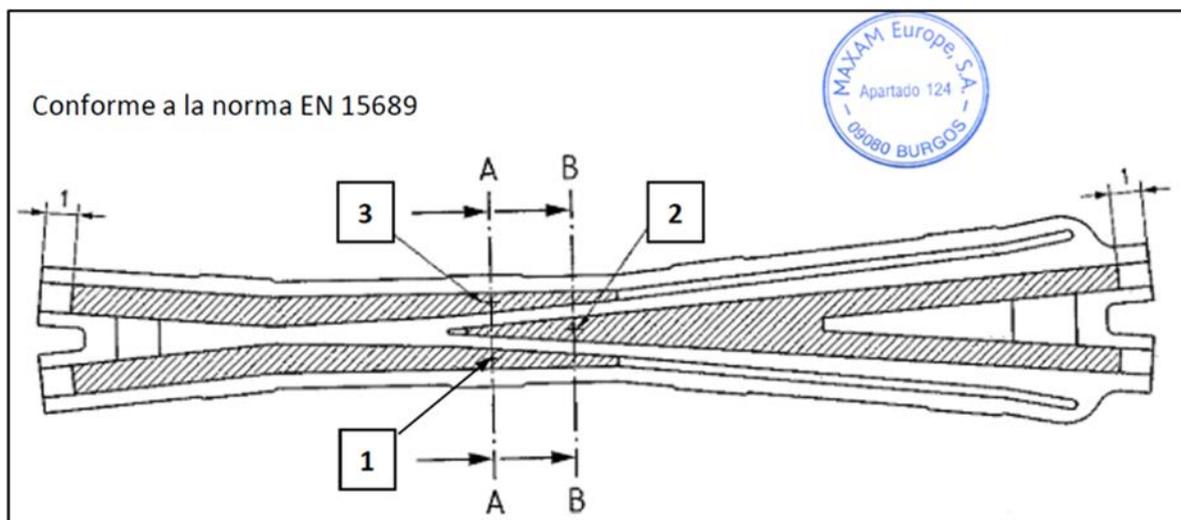


Figura 8. Esquema de cruzamiento, áreas de endurecimiento y puntos de control

En ellos se midieron la dureza inicial con un durómetro portátil calibrado modelo Equotip, de la empresa Proceq, con compensación automática, punta de carburo de tungsteno y un rango de medida de 150 a 950 HLD con una precisión de +/- 4 HLD, obteniéndose la siguiente tabla de valores:

	Pieza 1			Pieza 2			Pieza 3		
	Control 1	Control 2	Control 3	Control 1	Control 2	Control 3	Control 1	Control 2	Control 3
Medida 1 (HBW)	170,0	190	178	187	228	203	196	224	260
Medida 2 (HBW)	184,0	178	194	160	199	239	169	179	245
Medida 3 (HBW)	178,0	186	187	187	219	200	196	221	235
Valor promedio (HBW)	177,3	184,7	186,3	178,0	215,6	213,9	187,0	208,1	246,7
Valor promedio (HBW)	182,8 HBW			202,5 HBW			213,9 HBW		

	Pieza 4			Pieza 5			Media		
	Control 1	Control 2	Control 3	Control 1	Control 2	Control 3	Control 1	Control 2	Control 3
Medida 1 (HBW)	193,8	209,0	213,6	205,4	219,5	220,0	190,4	214,2	214,9
Medida 2 (HBW)	226,3	165,5	203,7	278,4	144,0	213,9	203,5	173,2	219,1
Medida 3 (HBW)	190,5	195,3	220,7	186,7	218,7	244,9	187,7	208,0	217,5
Valor promedio (HBW)	203,5	189,9	212,7	223,5	194,1	226,3	193,9	198,5	217,2
Valor promedio (HBW)	202,0 HBW			214,6 HBW			203,2 HBW		

Tabla 3. Valores iniciales 1 detonación

El endurecimiento se llevó a cabo con un único disparo. El explosivo que se empleó fue una lámina de 4,5 mm de RIOMETAL, fabricado por MAXAM, y el proceso fue llevado a cabo en el campo de tiro de MAXAM en Páramo de Masa (Burgos).

Tras el endurecimiento, se volvieron a medir las durezas siguiendo el mismo procedimiento y con los mismos equipos de medida, obteniéndose los siguientes resultados.

	Pieza 1			Pieza 2			Pieza 3		
	Control 1	Control 2	Control 3	Control 1	Control 2	Control 3	Control 1	Control 2	Control 3
Medida 1 (HBW)	340,0	334	357	367,0	363	344	358,0	373	391
Medida 2 (HBW)	343,0	359	339	351,0	371	358	367,0	391	382
Medida 3 (HBW)	338,0	365	346	355,0	359	376	364,0	384	407
Valor promedio (HBW)	340,3	352,7	347,3	357,7	364,3	359,3	363,0	382,7	393,3
Valor promedio (HBW)	346,8 HBW			360,4 HBW			379,7 HBW		

	Pieza 4			Pieza 5			Media		
	Control 1	Control 2	Control 3	Control 1	Control 2	Control 3	Control 1	Control 2	Control 3
Medida 1 (HBW)	371,0	354	388	367,0	347	333	360,6	354,2	362,6
Medida 2 (HBW)	384,0	357	359	352,0	384	343	359,4	372,4	356,2
Medida 3 (HBW)	382,0	349	367	356,0	369	347	359,0	365,2	368,6
Valor promedio (HBW)	379,0	353,3	371,3	358,3	366,7	341,0	359,7	363,9	362,5
Valor promedio (HBW)	367,9 HBW			355,3 HBW			362,0 HBW		

Tabla 4. Valores finales tras 1 detonación

Como se puede observar, en todas las mediciones (45/45) los valores de dureza Brinell obtenidos son superiores a 334 HBW, con valores puntuales superiores a 390 HBW. El valor promedio fue de 362 HBW, que supone un incremento de la dureza media del 78%. La inspección final de las piezas no detectó ninguna grieta ni deformación fuera de rango.

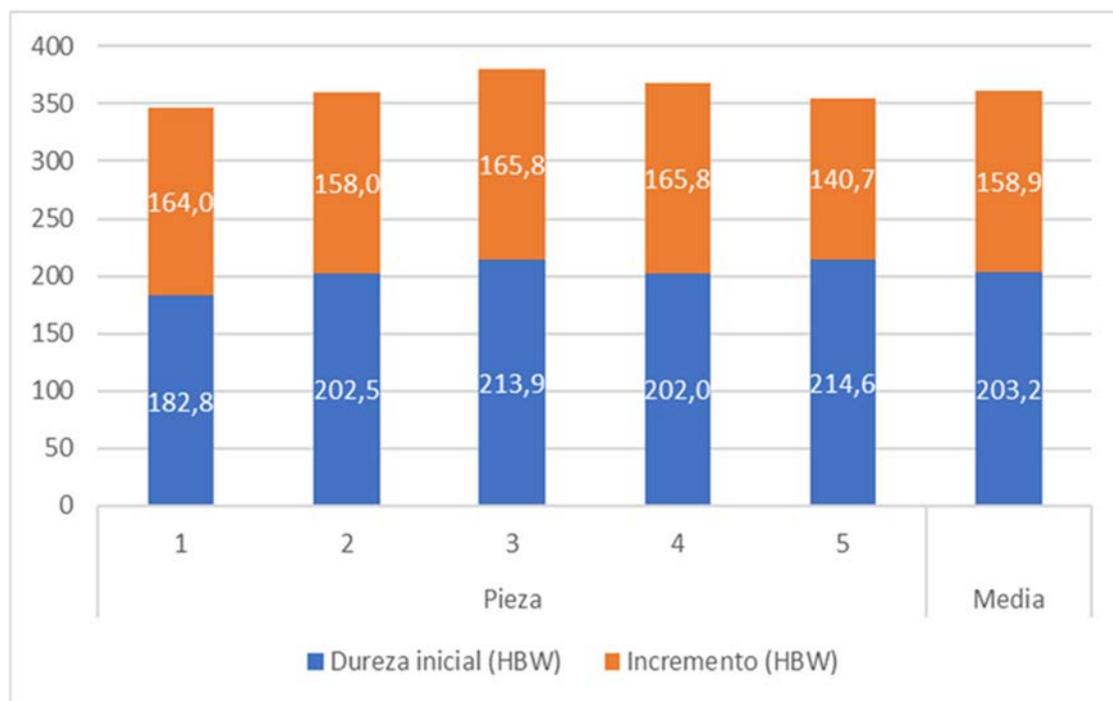


Figura 9. Incremento de dureza Brinell tras 1 detonación. Representación gráfica

4.2 Caso 2: Endurecimiento con dos detonaciones

En este caso, se trataba de endurecer una pieza con 11 puntos de control, cuyo esquema es el siguiente:

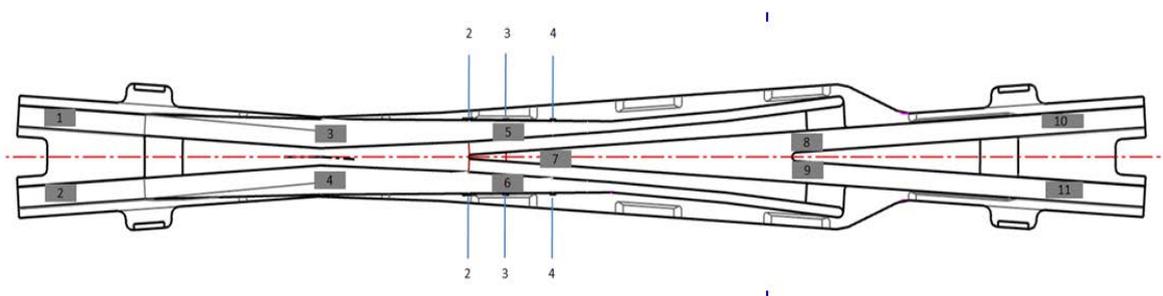


Figura 10. Esquema del cruzamiento

De cada uno de los puntos de control se tomaron 3 medidas de dureza antes y después de cada una de las detonaciones para un total de 99 valores de dureza HBW que se midieron con el mismo durómetro portátil calibrado modelo Equotip.

El endurecimiento se llevó a cabo con dos detonaciones. El explosivo que se empleó fue una lámina de 4,5 mm de RIOMETAL, fabricado por MAXAM, y el proceso fue llevado a cabo en el campo de tiro de MAXAM en Páramo de Masa (Burgos).

Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

Momento de la medida	Medidas de durezas (HBW)															
	Punto1			Valor medio	Punto2			Valor medio	Punto3			Valor medio	Punto4			Valor medio
Previo explosionado	226,0	222,0	218,0	222,0	192,0	201,0	204,0	199,0	213,0	193,0	200,0	202,0	185,0	197,0	200,0	194,0
Tras 1 ^{er} explosionado	303,0	324,0	323,0	316,7	311,0	315,0	333,0	319,7	310,0	336,0	346,0	330,7	325,0	349,0	362,0	345,3
Tras 2 ^{er} explosionado	350,0	352,0	351,0	351,0	356,0	351,0	354,0	353,7	355,0	351,0	352,0	352,7	371,0	357,0	352,0	360,0
	Punto5			Valor medio	Punto6			Valor medio	Punto7			Valor medio	Punto8			Valor medio
Previo explosionado	227,0	236,0	203,0	222,0	267,0	233,0	234,0	244,7	193,0	255,0	204,0	217,3	179,0	177,0	205,0	187,0
Tras 1 ^{er} explosionado	321,0	372,0	340,0	344,3	323,0	333,0	331,0	329,0	319,0	318,0	343,0	326,7	345,0	323,0	345,0	337,7
Tras 2 ^{er} explosionado	393,0	376,0	364,0	377,7	354,0	361,0	360,0	358,3	399,0	352,0	356,0	369,0	354,0	359,0	354,0	355,7
	Punto9			Valor medio	Punto10			Valor medio	Punto11			Valor medio	VALOR MEDIO			Valor medio
Previo explosionado	181,0	184,0	186,0	183,7	190,0	174,0	162,0	175,3	180,0	176,0	184,0	180,0	203,0	204,4	200,0	202,5
Tras 1 ^{er} explosionado	338,0	330,0	341,0	336,3	333,0	339,0	345,0	339,0	335,0	343,0	349,0	342,3	323,9	334,7	341,6	333,4
Tras 2 ^{er} explosionado	372,0	353,0	364,0	363,0	352,0	357,0	366,0	358,3	358,0	352,0	364,0	358,0	364,9	356,5	357,9	359,8

Tabla 5: Valores de dureza antes y tras cada detonación.

Mientras que los valores medios de dureza antes del disparo (pieza sin endurecer) variaban entre 175 y 245 HBW (media 202 HBW), la dureza superficial tras la primera detonación subía hasta 317 y 345 HBW (media 333 HBW), lo que supone un incremento de un +64,7% de la dureza superficial.

Tras la segunda detonación, la dureza media en cada punto de control osciló entre 351 y 378 HBW (media 360 HBW) lo que supone un aumento de un +7,9%.

5. CONCLUSIONES

El endurecimiento con explosivos de los corazones de los cruzamientos ferroviarios de acero Hadfield es una técnica ampliamente extendida que permite aumentar su resistencia al desgaste, lo que implica una reducción de su mantenimiento y una extensión de su vida útil.

Según los estudios realizados por los principales fabricantes de cruzamientos y operadores de líneas férreas, instalando un cruzamiento pre-endurecido se pueden conseguir las siguientes ventajas:

- **Reducción de los costes de mantenimiento** en un 50%, principalmente en los primeros meses después de su instalación.
- **Aumento de su vida útil** (carga soportada) en un 40%
- **Reducción del coste del ciclo de vida** en un 20%, considerando también el sobrecoste que supone el pre-endurecimiento del cruzamiento.

Adicionalmente, la reducción de mantenimiento y el alargamiento de su vida útil suponen una reducción del número y tiempo de paradas y estancias fuera de servicio. Todos ellos, aspectos fundamentales para los gestores de redes ferroviarias

En este documento se mostraron los requisitos exigidos para los cruzamientos pre-endurecidos con explosivos por los principales gestores de este tipo de instalaciones en diversas partes del mundo.

También se describió el proceso RIOMETAL, desarrollado por MAXAM específicamente para el endurecimiento de cruzamientos, y se mostraron los resultados experimentales obtenidos en cerca de 1.400 de los más de 4.000 endurecimientos llevados a cabo en sus instalaciones del Páramo de Masa (Burgos), donde también está su centro de producción del explosivo y el Centro de Innovación del Grupo MAXAM para todo el mundo.

Analizando tanto los datos históricos y como los últimos ejemplos, se puede afirmar que con el proceso RIOMETAL se alcanzan y sobrepasan las durezas requeridas tanto por las normas europeas como por las normas norteamericana y australiana, aún más exigentes, para la dureza superficial de los corazones de punta fija de cruzamientos ferroviarios.



Figura 11. Ilustración de ejemplo