

ARTÍCULO ORIGINAL

Evaluación de la integridad estructural de herramientas de corte recuperadas mediante soldadura por arco sumergido (SAW) para maquinaria pesada

Structural integrity assessment of cutting tools recovered by submerged arc welding (SAW) for heavy machinery

Luis Llanos ¹, Frans Fuentes ², Ricardo Shimabuku ³, Mario Olivera ⁴, Jaime Honorio ⁵ y Boy Vásquez ⁶

RESUMEN

Las herramientas de corte utilizadas en maquinaria pesada están sometidas a condiciones severas de abrasión, impacto y cargas cíclicas que producen pérdida progresiva de material y reducen su vida útil. El objetivo de esta investigación fue evaluar la integridad estructural de herramientas de corte recuperadas mediante soldadura por arco sumergido (SAW) para determinar su viabilidad de reutilización. La recuperación se realizó empleando acero antidesgaste T-500, alambre EL-12 de 3,2 mm y fundente R35Mo, con parámetros de 350 A, 30 V y una velocidad de avance de 30 cm/min. Se efectuaron análisis microestructurales y de composición química, ensayos de tracción, impacto, dureza y desgaste, complementados con análisis estructural y de fatiga. La resistencia promedio a la tracción fue 1014,5 MPa, con rotura localizada en el metal base, y la energía promedio absorbida fue 124,13 J. La zona soldada presentó una velocidad promedio de desgaste de 0,01040 g/min frente a 0,01400 g/min del metal base, equivalente a una reducción del 25,7 %. El análisis de fatiga estimó 61 447 ciclos para alcanzar el daño acumulado total. Los resultados evidencian la viabilidad técnica del procedimiento SAW para recuperar las herramientas estudiadas.

Palabras clave: Soldadura por arco sumergido; integridad estructural; herramientas de corte; desgaste abrasivo; maquinaria pesada.

ABSTRACT

The cutting tools used in heavy machinery are subjected to severe abrasion, impact, and cyclic loading conditions, which cause progressive material loss and reduce their service life. The objective of this research was to evaluate the structural integrity of cutting tools restored by submerged arc welding (SAW) in order to determine their feasibility for reuse. The restoration process was carried out using T-500 wear-resistant steel, 3.2 mm EL-12 welding wire, and R35Mo flux, with welding parameters of 350 A, 30 V, and a travel speed of 30 cm/min. Microstructural and chemical composition analyses were performed, together with tensile, impact, hardness, and wear tests, complemented by structural and fatigue analyses. The average tensile strength was 1014.5 MPa, with fracture occurring in the base metal, while the average absorbed impact energy was 124.13 J. The welded zone exhibited an average wear rate of 0.01040 g/min compared with 0.01400 g/min for the base metal, representing a 25.7% reduction. Fatigue analysis estimated 61,447 cycles to reach total cumulative damage. The results demonstrate the technical feasibility of the SAW process for restoring the cutting tools evaluated.

Keywords: submerged arc welding; structural integrity; cutting tools; abrasive wear; heavy machinery

* Autor para correspondencia

¹ Universidad Nacional de Jaén, Perú. Email: luis.llanos@unj.edu.pe, ingfrans@unj.edu.pe, shimabuku.ysa@unj.edu.pe, olivera_aldana@unj.edu.pe, jaime_honorio@unj.edu.pe

² Universidad Nacional de Trujillo, Perú. Email: boyvasquez85@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Las herramientas de corte (uñas) instaladas en maquinaria pesada utilizadas en trabajos de movimiento de tierras están expuestas a condiciones severas de operación durante las actividades de excavación, movimiento, penetración de materiales como rocas y partículas abrasivas que producen pérdida progresiva de material de la herramienta modificación de la geometría original y disminuyendo su capacidad operativa. Estudios recientes realizados en equipos utilizados en canteras han identificado el desgaste abrasivo como uno de los mecanismos responsables del deterioro de componentes como dientes de excavadoras, cargadores frontales entre otros generando reemplazos frecuentes, mayores costos de mantenimiento y periodos de indisponibilidad del equipo (Floreza et al., 2025).

Frente a este problema, la recuperación de componentes mediante recargue o *hardfacing* es una práctica utilizada para restituir superficies deterioradas y prolongar la vida de piezas mecánicas sometidas a condiciones de desgaste. La aplicación de materiales duros sobre regiones críticas que están en contacto con el material abrasivo permite modificar las propiedades mecánicas superficiales, esta práctica contribuye al aprovechamiento de piezas que de otro modo serían descartadas.

Entre los procedimientos disponibles, la soldadura por arco sumergido (*Submerged Arc Welding*, SAW) presenta características favorables para la recuperación de componentes debido a su elevada tasa de deposición, estabilidad del proceso y posibilidad de controlar parámetros como corriente, voltaje y velocidad de avance. Estas variables influyen sobre la penetración, geometría del cordón, aporte térmico, microestructura y propiedades mecánicas resultantes del material depositado (Singh & Singh, 2020).

La recuperación mediante soldadura, sin embargo, no debe evaluarse únicamente a partir de la reconstrucción de la geometría original. Se conoce que los ciclos térmicos generados durante el proceso de soldado ocasionan regiones metalúrgicamente diferenciadas entre el metal depositado, la zona afectada por el calor (ZAC) y el metal base, investigaciones realizadas en uniones mediante SAW han identificado diferencias microestructurales y de dureza entre estas regiones, así como modificaciones próximas a la línea de fusión (Küçükoner et al., 2020). De manera similar, la distribución térmica durante la soldadura condiciona la evolución microestructural y las propiedades mecánicas obtenidas posteriormente (Oo & Muangjunburee, 2018).

Una de las propiedades más significativas para estas condiciones de trabajo es la resistencia al desgaste abrasivo. Investigaciones sobre recubrimientos obtenidos mediante SAW han demostrado que el comportamiento frente al desgaste depende de factores como composición química, microestructura, dilución, número de capas y condiciones de deposición (Zahiri et al., 2014; Oo & Muangjunburee, 2018). Estudios más recientes muestran también que modificaciones de los parámetros de recargue pueden producir cambios significativos en la microestructura, dureza y resistencia al desgaste (Balos et al., 2025). No obstante, una mayor dureza no garantiza necesariamente una mayor resistencia a la abrasión, debido a que el comportamiento tribológico depende de la interacción entre las fases presentes, la matriz y el mecanismo de desgaste (Muangjunburee et al., 2025).

Por otro lado, las herramientas de corte de maquinaria pesada(uñas) están sometidas a cargas variables durante los ciclos de operación frente a ello, la evaluación de las herramientas de corte recuperado no solo debe limitarse a la evaluación de sus propiedades superficiales sino también su capacidad para soportar esfuerzos cíclicos, el fenómeno de fatiga puede verse influenciado por estos factores (McLaughlin & Mehmanparast, 2026).

Actualmente diferentes investigaciones han estudiado la influencia del hardfacing y del proceso SAW sobre la microestructura, dureza o resistencia al desgaste, la evaluación conjunta de estas propiedades con la resistencia a la tracción, impacto y comportamiento a fatiga resulta particularmente importante cuando se pretende aplicar a una herramienta de corte (uña) para mantenerla en servicio. Limitarse analizar una propiedad en específico es básico cuando se pretende analizar la integridad estructural de una herramienta de corte (Uña), en este sentido es necesario analizar desde un enfoque que integre los resultados metalúrgicos, mecánicos y tribológicos con la evaluación estructural del componente recuperado.

Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la integridad estructural de herramientas de corte recuperadas mediante soldadura por arco sumergido (SAW), a partir de la caracterización microestructural y química, las propiedades mecánicas, la resistencia al desgaste y el comportamiento frente a cargas cíclicas, con la finalidad de determinar la viabilidad técnica de su reutilización en aplicaciones de maquinaria pesada.

Como hipótesis general, se planteó que las herramientas de corte recuperadas mediante soldadura por arco sumergido (SAW), empleando acero T-500, alambre EL-12 de 3,2 mm y fundente R35Mo bajo los parámetros establecidos, presentan, en las condiciones ensayadas y

simuladas, una integridad estructural compatible con su reutilización técnica en aplicaciones de maquinaria pesada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

La investigación se desarrolló utilizando herramientas de corte (uñas) desgastadas pertenecientes a un cargador frontal Caterpillar 938G, las cuales fueron seleccionadas como material base para el proceso de recuperación. Estas herramientas están fabricadas en acero de baja aleación DH-3 bonificado, con una dureza nominal comprendida entre 45 y 50 HRC, condición que proporciona una adecuada combinación entre resistencia mecánica y tenacidad para aplicaciones sometidas a desgaste e impacto. La composición química y las propiedades mecánicas del acero fueron consideradas como referencia para la caracterización del componente recuperado.

Como material de reconstrucción se empleó una plancha de acero antidesgaste T-500, utilizada para restituir la geometría original de la herramienta antes de la aplicación del recubrimiento superficial. Este acero se caracteriza por su elevada resistencia mecánica y su comportamiento favorable frente al desgaste abrasivo, propiedades que justifican su uso en componentes sometidos a condiciones severas de servicio. De acuerdo con las recomendaciones del fabricante, el material fue precalentado previamente para minimizar gradientes térmicos y reducir el riesgo de fisuración durante la soldadura.

La recuperación se realizó mediante soldadura por arco sumergido (SAW), empleando alambre EL-12 de 3,2 mm de diámetro y fundente R35Mo. Esta combinación fue seleccionada por su capacidad para generar depósitos con alta resistencia al desgaste y propiedades mecánicas adecuadas para la reconstrucción de componentes utilizados en maquinaria pesada.

Tabla 1

Materiales empleados durante el proceso de recuperación de las herramientas de corte

Material	Especificación	Función en la investigación
Herramienta de corte desgastada	Uña de cargador frontal Caterpillar 938G fabricada en acero DH-3 bonificado	Material base utilizado para la recuperación y posterior evaluación de la integridad estructural.
Acero antidesgaste	T-500	Reconstrucción geométrica de la herramienta antes de la aplicación del recubrimiento mediante soldadura SAW.
Alambre de soldadura	EL-12, Ø 3,2 mm	Material de aporte utilizado durante el proceso de soldadura por arco sumergido.

Fundente	R35Mo	Protección del arco eléctrico y estabilización del proceso de soldadura, favoreciendo la calidad metalúrgica del depósito.
Equipo de soldadura	Proceso SAW	Recuperación de la herramienta mediante deposición controlada del material de aporte.
Equipos de caracterización	Microscopía óptica, espectrómetro y equipos para ensayos mecánicos	Evaluación de la composición química, microestructura y propiedades mecánicas del componente recuperado.

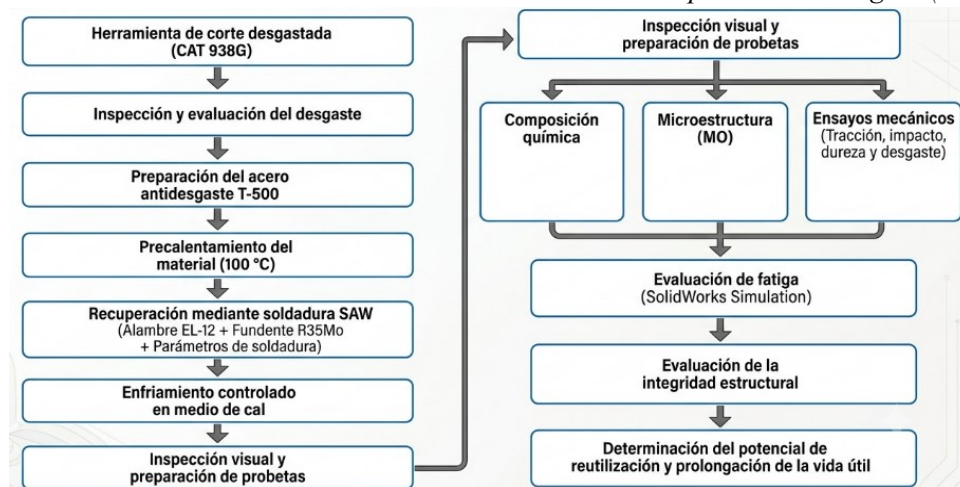
Procedimiento de recuperación mediante soldadura SAW

Las herramientas de corte fueron previamente inspeccionadas para identificar el nivel de desgaste y definir la zona de reconstrucción. Posteriormente, el acero T-500 fue conformado de acuerdo con las dimensiones originales de la herramienta y acondicionado mediante operaciones de corte, limpieza superficial y preparación de bordes.

Antes de iniciar la soldadura, el material de reconstrucción fue precalentado a 100 °C utilizando un pirómetro infrarrojo para verificar la uniformidad de la temperatura. La recuperación se efectuó mediante el proceso SAW utilizando un alambre EL-12 de 3,2 mm y fundente R35Mo, estableciendo una corriente de 350 A, un voltaje de 30 V y una velocidad de avance de 30 cm/min, parámetros seleccionados de acuerdo con las especificaciones técnicas del fabricante. Finalizada la deposición, las herramientas recuperadas fueron sometidas a un enfriamiento lento en un medio de cal, seguido de la remoción de escoria y una inspección visual para verificar la continuidad del cordón y detectar posibles discontinuidades superficiales.

Figura 1

Diagrama del procedimiento experimental seguido para la recuperación y evaluación de herramientas de corte mediante soldadura por arco sumergido (SAW)



Caracterización experimental

Con el propósito de evaluar la influencia del proceso de recuperación sobre la integridad estructural de las herramientas de corte, se desarrolló un programa de caracterización que integró análisis metalúrgicos, ensayos mecánicos y evaluación del comportamiento frente al desgaste.

La composición química del metal base y del material de aporte fue determinada para verificar la compatibilidad metalúrgica entre los materiales utilizados durante la recuperación. Posteriormente, se realizó la caracterización microestructural de la unión soldada con el fin de identificar las transformaciones ocurridas en el metal depositado, la zona afectada por el calor y el metal base.

Las propiedades mecánicas fueron evaluadas mediante ensayos de tracción, impacto y dureza, siguiendo las normas correspondientes indicadas en la tesis (ASTM E18 y ASTM E92 para dureza, entre otras). Asimismo, la resistencia al desgaste abrasivo fue determinada mediante el procedimiento establecido en la norma ASTM G65, permitiendo comparar el comportamiento del material recuperado con el metal base. Finalmente, la capacidad del componente para soportar cargas cíclicas fue analizada mediante un estudio de fatiga complementado con la caracterización del ciclo de trabajo del cargador frontal y el análisis por elementos finitos desarrollado en SolidWorks Simulation.

Análisis de datos.

Los resultados experimentales obtenidos fueron analizados de manera conjunta para establecer la relación entre la microestructura generada durante el proceso SAW y el comportamiento mecánico del componente recuperado. La interpretación consideró conjuntamente la composición química, la respuesta a tracción, impacto, dureza, desgaste abrasivo y fatiga, con el propósito de determinar si el procedimiento de recuperación permitió restablecer la integridad estructural requerida para la reutilización de la herramienta en condiciones de servicio.

La hipótesis general se contrastó de manera descriptiva, sin recurrir a una prueba estadística inferencial, mediante los siguientes criterios de ingeniería: a) que la rotura en tracción no se localizara en la unión recuperada; b) que la velocidad promedio de desgaste de la zona soldada fuera menor que la del metal base; y c) que, en la condición crítica simulada, el factor de seguridad fuera mayor que 1 y el daño acumulado permaneciera por debajo del 100 % durante los 45502 ciclos evaluados. Los resultados de microestructura, impacto y dureza se utilizaron como evidencia complementaria. El cumplimiento conjunto de estos criterios se consideró respaldo descriptivo de la hipótesis dentro del alcance del estudio.

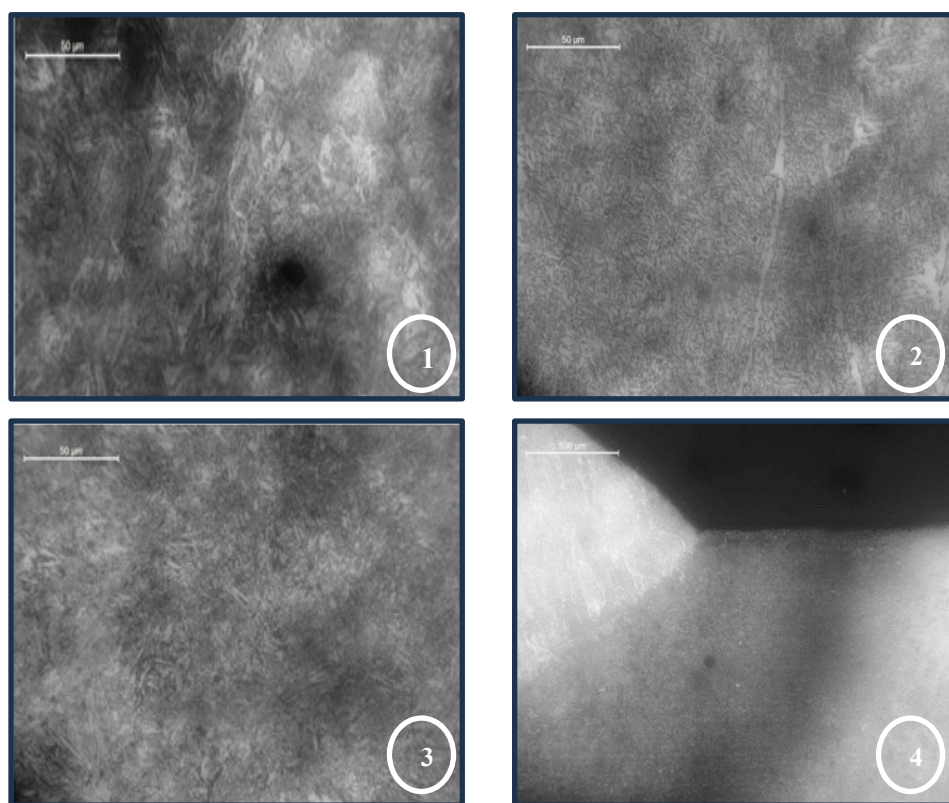
RESULTADOS

Caracterización microestructural y composición química.

La caracterización microestructural de la herramienta recuperada permitió identificar las diferentes regiones generadas después del proceso de soldadura por arco sumergido. Se analizaron el acero antidesgaste T-500, el recubrimiento obtenido mediante SAW con alambre EL-12 y fundente R35Mo, la zona de transición entre el metal base y la zona afectada por el calor (ZAC), el límite entre el metal base y el recubrimiento, así como la región constituida por metal base-ZAC-recubrimiento. Las micrografías fueron obtenidas a diferentes aumentos, entre 50× y 500×, en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Trujillo.

Figura 2

Microestructuras del material T-500, recubrimiento EL-12/R35Mo-SAW y regiones de transición metal base-ZAC-recubrimiento



Nota: Material de calzada anti desgaste T-500, 2. Recubrimiento proceso SAW-T500, 3. Zona ZAC, 4. Material base-Zona ZAC fuente laboratorio de materiales Universidad Nacional de Trujillo (UNT)

La composición química obtenida mediante el análisis realizado en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Trujillo mostró diferencias entre el metal base y el material de aporte.

Tabla 2*Composición química del metal base y material de aporte*

Elemento	Material de aporte (%)	Metal base (%)
B	0,0008	0,0011
C	0,1457	0,2469
Cr	0,6165	0,3887
Cu	0,0395	0,0071
Mn	0,8409	1,0327
Mo	0,1279	0,1977
Ni	0,2083	0,4855
P	0,0126	0,0074
Si	0,3818	0,4754
S	<0,0010	<0,0010

Nota: Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT)

Propiedades mecánicas de la unión recuperada

Resistencia a la tracción

Los ensayos de tracción realizados sobre la unión recuperada presentaron resistencias de 1026, 1007, 1010 y 1015 MPa, respectivamente. La elongación registrada fue de 66 %, 70 %, 68 % y 69 %. En los cuatro ensayos, la rotura se produjo en el material base, y no en la zona de unión soldada. El promedio de resistencia a la tracción fue de 1014,5 MPa, mientras que la elongación promedio fue de 68,25 %.

Tabla 3*Resultados del ensayo de tracción*

Probeta	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación (%)	Zona de rotura
E1	1026	66	Material base
E2	1007	70	Material base
E3	1010	68	Material base
E4	1015	69	Material base
Promedio	1014,5	68,25	—

Nota: Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Trujillo (UNT)

Resistencia al impacto

Las probetas de impacto presentaron valores de energía absorbida de 124,0; 124,5; 125,0 y 123,0 J. El valor promedio obtenido fue de 124,13 J.

Tabla 4*Resultados del ensayo de impacto*

Probeta	Energía absorbida (J)
E1	124,0
E2	124,5
E3	125,0
E4	123,0
Promedio	124,13

Nota: Laboratorio de Materiales - (UNT)

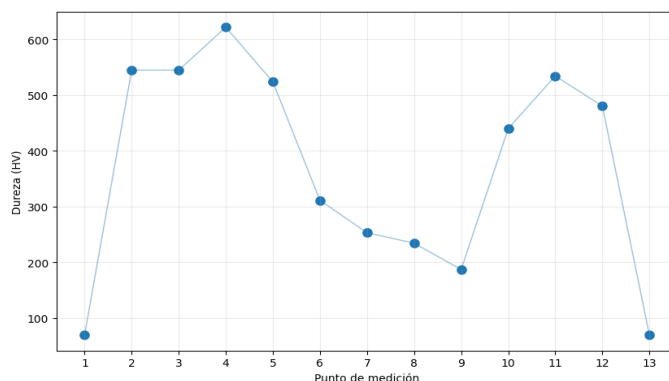
Los resultados muestran una variación reducida entre las cuatro probetas, con una diferencia máxima de 2 J entre el mayor y el menor valor obtenido.

Dureza

La evaluación de dureza presentó una distribución heterogénea entre los 13 puntos de medición, con valores comprendidos entre 69,2 y 621,7 HV. El valor máximo se registró en el punto 4, con 621,7 HV, mientras que el mínimo correspondió al punto 13, con 69,2 HV. Los puntos 2, 3, 4, 5, 10, 11 y 12 presentaron valores superiores a 440 HV, mientras que los puntos 6 a 9 mostraron valores entre 187,0 y 311,2 HV. Esta variabilidad evidencia diferencias en la respuesta de dureza entre los puntos evaluados; sin embargo, debido a que no se dispone de la ubicación espacial exacta de cada punto sobre la sección transversal, los valores se presentan únicamente según su identificación experimental y no se asignan directamente a las regiones de metal base, ZAC o recubrimiento.

Figura 3

Distribución de los valores de dureza Vickers en los puntos de medición de la herramienta recuperada mediante SAW

*Nota:* Laboratorio de Materiales - (UNT)

Resistencia al desgaste

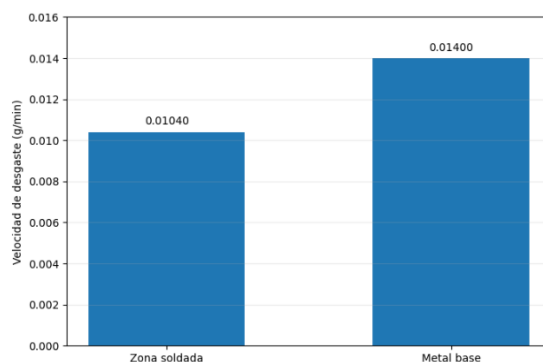
Los ensayos realizados mostraron diferencias en la velocidad de desgaste entre la zona soldada y el metal base. En las dos muestras correspondientes a la zona soldada se registraron pérdidas de masa de 0,0209 y 0,0207 g durante un tiempo de ensayo de 2 min, obteniéndose

velocidades de desgaste de 0,01045 y 0,01035 g/min, respectivamente. En el metal base, las pérdidas de masa fueron de 0,0276 y 0,0284 g, correspondientes a velocidades de desgaste de 0,01380 y 0,01420 g/min.

La velocidad promedio de desgaste fue de 0,01040 g/min para la zona soldada y 0,01400 g/min para el metal base. A partir de estos valores se determinó una reducción aproximada del 25,7 % en la velocidad de desgaste de la zona soldada respecto al metal base, evidenciando una menor pérdida de material en la superficie recuperada bajo las condiciones del ensayo.

Figura 4

Comparación de la velocidad de desgaste



Nota: Laboratorio de Materiales - (UNT)

Comportamiento estructural y vida útil

El análisis estructural mediante SolidWorks Simulation permitió evaluar la respuesta de la herramienta recuperada bajo las condiciones de carga identificadas durante la caracterización del trabajo del cargador frontal. La investigación consideró diferentes sucesos asociados con materiales de trabajo y condiciones de operación, incluyendo cantera, relleno y material arcilloso.

El análisis de fatiga consideró un total de 45 502 ciclos teóricos asociados al periodo de trabajo evaluado. La aplicación de la regla de Miner permitió estimar aproximadamente 61 447 ciclos para alcanzar el 100 % de daño. Para los sucesos considerados se obtuvieron 6 825 ciclos teóricos para el suceso N.º 01, 6 825 para el N.º 02, 9 100 para el N.º 03 y 22 752 para el N.º 04.

Tabla 5

Resultados del análisis de fatiga

Suceso	Material	Ciclos teóricos	Ciclos aproximados para la falla
N.º 01	Cantera	6 825	9 217
N.º 02	Cantera	6 825	9 217
N.º 03	Relleno	9 100	12 289

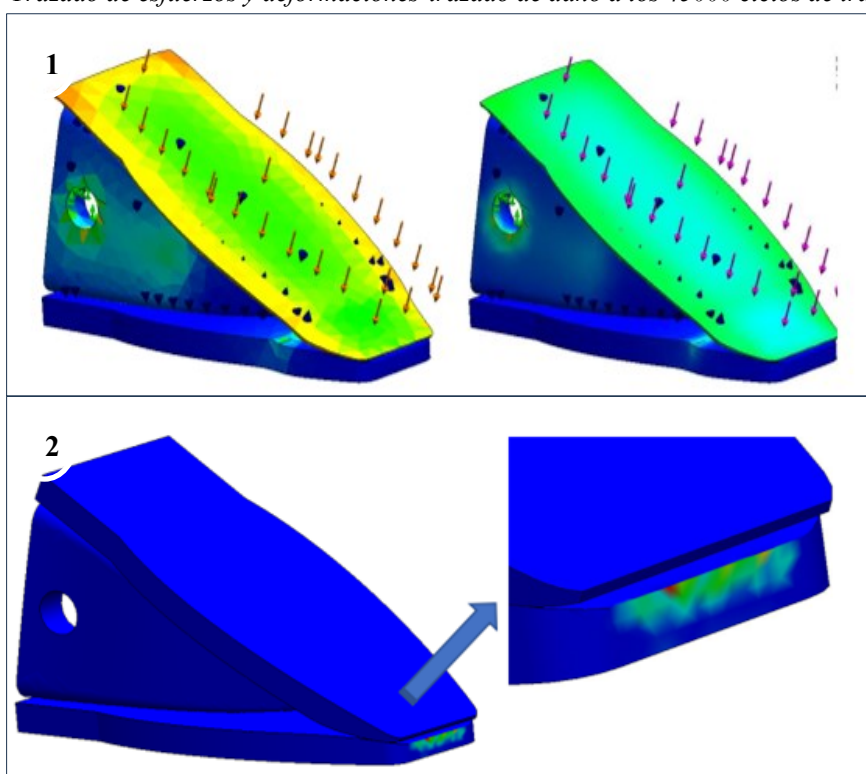
N.º 04	Arcilla	22 752	30 724
Total	—	45 502	61 447

Nota: Laboratorio de Materiales - (UNT)

El trazado de daño mostró que, para los 45 502 ciclos teóricos, la región crítica alcanzó aproximadamente 74 % de daño, mientras que la aproximación utilizada en la investigación estimó el 100 % de daño en 61 447 ciclos asimismo, considerando las condiciones de trabajo analizadas, la vida de la herramienta recuperada fue estimada en aproximadamente cuatro meses para alcanzar la condición de falla, frente a los tres meses correspondientes al periodo de trabajo utilizado para la caracterización finalmente, para la condición de carga crítica se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 1,172 considerando una fuerza de penetración de 114 kN, una fuerza de desgarre de 114 kN y 6 825 ciclos.

Figura 5

Trazado de esfuerzos y deformaciones-trazado de daño a los 45000 ciclos de trabajo



El trazado de daño mostró que, para los 45 502 ciclos teóricos, la región crítica alcanzó aproximadamente 74 % de daño, mientras que la aproximación utilizada en la investigación estimó el 100 % de daño en 61 447 ciclos.

Asimismo, considerando las condiciones de trabajo analizadas, la vida de la herramienta recuperada fue estimada en aproximadamente cuatro meses para alcanzar la condición de falla, frente a los tres meses correspondientes al periodo de trabajo utilizado para la caracterización.

Finalmente, para la condición de carga crítica se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 1,172, considerando una fuerza de penetración de 114 kN, una fuerza de desgarre de 114 kN y 6 825 ciclos.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten establecer que la recuperación de las herramientas de corte mediante soldadura por arco sumergido (SAW) produjo una respuesta mecánica y tribológica. La evaluación de la microestructura, propiedades mecánicas como resistencia a la tracción, impacto, dureza, desgaste abrasivo y comportamiento a fatiga proporciona la información necesaria para el análisis de la integridad estructural de las herramientas de corte (uñas) contempladas en la presente investigación, el proceso de recuperación utilizó los materiales como acero antidesgaste T-500 empleando alambre EL-12 de 3,2 mm y fundente R35Mo, con parámetros de soldadura recomendados por el fabricante de 350 A, 30 V y una velocidad de avance de 30 cm/min. Estos parámetros son críticos e influyen directamente sobre la penetración, geometría del cordón, composición y propiedades mecánicas obtenidas mediante SAW (Singh & Singh, 2020).

La caracterización microestructural permitió diferenciar el material base, la zona afectada por el calor ZAC y el recubrimiento depositado mediante SAW, asimismo, la composición química mostró diferencias entre el material de aporte y el metal base, particularmente en los contenidos de C, Cr, Mn, Mo y Ni. Estas variaciones resultan relevantes debido a que la composición química, conjuntamente con las condiciones térmicas de soldadura y solidificación, influye sobre las características microestructurales y las propiedades mecánicas de la unión. Estudios realizados en uniones obtenidas mediante SAW han mostrado diferencias microestructurales entre el metal de soldadura, la ZAC y el metal base, registrándose además variaciones en dureza y tamaño de grano próximas a la línea de fusión (Küçükoner et al., 2020).

Del mismo modo, se ha señalado que la distribución térmica generada durante el proceso de soldadura influye sobre la evolución metalúrgica y, posteriormente, sobre las propiedades mecánicas del material (Oo & Muangjunburee, 2018).

Los ensayos de tracción mostraron resistencias comprendidas entre 1007 y 1026 MPa, alcanzando un promedio de 1014,5 MPa, mientras que la elongación promedio fue de 68,25 %. Un aspecto especialmente relevante fue que las probetas presentaron la rotura en el material base y no en la zona de unión soldada este comportamiento constituye un indicador favorable de la estructura mecánica en el proceso de recuperación en concordancia a resultados similares

han sido reportados en determinadas uniones realizadas mediante SAW (Küçükoner et al., 2020). En este sentido, los resultados obtenidos permiten considerar que la unión soldada presentó capacidad suficiente para transferir las solicitaciones mecánicas hacia el material base sin producir una falla prematura en la región recuperada.

Respecto a la resistencia al impacto, las cuatro probetas presentaron energías absorbidas entre 123 y 125 J, con un promedio de 124,13 J y una diferencia máxima de 2 J entre los valores obtenidos. La baja variación observada entre las probetas evidencia una respuesta relativamente uniforme frente a este tipo de sollicitación. Esta propiedad resulta importante en herramientas de corte utilizadas en maquinaria pesada, puesto que durante las operaciones de penetración, excavación y movimiento de material pueden presentarse cargas dinámicas e impactos además del fenómeno de abrasión. No obstante, la resistencia al impacto debe analizarse conjuntamente con la dureza, ya que una mayor dureza no necesariamente implica un incremento simultáneo de la tenacidad. En procesos SAW se ha reportado que determinadas modificaciones en corriente y voltaje pueden incrementar la dureza, pero simultáneamente producir reducciones en propiedades como la resistencia al impacto, lo que demuestra la necesidad de alcanzar un equilibrio entre dureza, resistencia y tenacidad (Singh & Singh, 2020).

La evaluación de la dureza presentó una marcada heterogeneidad, obteniéndose valores comprendidos entre 69,2 y 621,7 HV. Siete puntos de medición presentaron valores superiores a 440 HV, mientras que otros registraron mediciones menores la literatura especializada indica que las propiedades mecánicas de los depósitos obtenidos mediante SAW se encuentran relacionadas con su macroestructura y microestructura y que parámetros como corriente, voltaje y velocidad pueden modificar la dureza del material depositado (Singh & Singh, 2020). De manera similar, investigaciones recientes sobre recubrimientos duros han demostrado que los cambios microestructurales y la presencia de fases endurecedoras pueden modificar considerablemente los niveles de dureza alcanzados por el material depositado (Prysyazhnyuk et al., 2026).

Los resultados correspondientes al desgaste constituyen uno de los hallazgos más importantes del estudio. La zona soldada presentó velocidades de desgaste de 0,01045 y 0,01035 g/min, mientras que el metal base alcanzó 0,01380 y 0,01420 g/min. Los valores promedio fueron de 0,01040 g/min para la zona soldada y 0,01400 g/min para el metal base, representando una disminución aproximada del 25,7 % en la velocidad de desgaste de la superficie recuperada

esto indica que, bajo las condiciones la superficie recuperada presentó mayor resistencia frente al desgaste abrasivo que el material base.

La tendencia obtenida presenta correspondencia con estudios realizados directamente sobre recubrimientos obtenidos mediante SAW. Se ha demostrado que este proceso puede mejorar el comportamiento frente al desgaste de componentes sometidos a abrasión, principalmente cuando se controlan adecuadamente el material de aporte, la dilución y las condiciones de deposición (Zahiri et al., 2014). Asimismo, en recubrimientos realizados sobre acero al 3,5 % Cr mediante SAW se encontró que el número de capas, la microestructura y las condiciones del procedimiento influyen significativamente sobre la resistencia al desgaste; las configuraciones de tres capas presentaron mejor comportamiento abrasivo que las de una sola capa (Oo & Muangjunburee, 2018).

La literatura reciente también respalda la relación entre las características microestructurales del recubrimiento y su resistencia a la abrasión. Balos et al. encontraron que la corriente y la velocidad utilizadas durante el recargue modifican la microestructura y pueden favorecer la formación de constituyentes duros, afectando directamente el comportamiento frente al desgaste (Balos et al., 2025). Estos resultados respaldan la necesidad de analizar de manera conjunta los parámetros de soldadura, la microestructura y el comportamiento tribológico, en lugar de interpretar la resistencia al desgaste únicamente a partir de la dureza.

En efecto, los resultados disponibles muestran que mayor dureza no necesariamente significa mayor resistencia al desgaste. Muangjunburee et al. encontraron que un acero de riel R260 presentó la mayor resistencia al desgaste pese a registrar una dureza inferior a algunos de los metales utilizados para su reparación; por el contrario, uno de los recubrimientos con mayor dureza presentó menor resistencia frente al desgaste (Muangjunburee et al., 2025). Por esta razón, la reducción del 25,7 % obtenida en la presente investigación no debe atribuirse exclusivamente a los valores de dureza, sino al efecto combinado de la composición química, la microestructura, las características del material depositado y el mecanismo de desgaste desarrollado durante el ensayo.

Esta consideración coincide además con investigaciones recientes sobre recubrimientos reforzados, donde la resistencia al desgaste depende no solamente del nivel de dureza alcanzado, sino también de la distribución, estabilidad y características de las fases duras presentes en la matriz. (Luo et al., 2026).

Investigaciones recientes realizadas directamente sobre equipos de cantera han identificado a las herramientas de corte de cargadores frontales, excavadora entre los componentes críticos afectados por desgaste abrasivo y reemplazos frecuentes frente a ello se ha propuesto la recuperación mediante soldadura como alternativa para disminuir costos y tiempos de parada (Floreza et al., 2025). Esto coincide con el propósito del procedimiento desarrollado en el presente trabajo, orientado a recuperar una herramienta (diente) que había alcanzado el límite de vida debido al desgaste y se realizó la reconstrucción geométrica y posterior revestimiento superficial utilizando nuevos aportes y procesos de soldadura SAW.

El análisis estructural y de fatiga complementó los resultados experimentales debido a que permitió evaluar el comportamiento de la herramienta recuperada frente a condiciones asociadas con su operación. Se estimaron 45 502 ciclos teóricos para el periodo analizado y, mediante la regla de Miner, aproximadamente 61 447 ciclos para alcanzar el 100 % de daño.

Para los 45502 ciclos considerados, la región crítica alcanzó aproximadamente 74 % de daño, mientras que la vida útil fue estimada en aproximadamente cuatro meses bajo las condiciones propuestas. Asimismo, para la condición de carga crítica se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 1,172 con fuerzas de penetración y desgarre de 114 kN. Estos resultados deben interpretarse considerando que la fatiga en componentes soldados constituye un fenómeno multifactorial la geometría del cordón, las concentraciones de esfuerzos, propiedades mecánicas locales, características de la ZAC, porosidad, rugosidad superficial y tensiones residuales pueden intervenir en la iniciación y propagación de grietas por fatiga (McLaughlin & Mehmanparast, 2026). Por ello, la simulación realizada debe entenderse como una estimación de la respuesta estructural bajo las condiciones establecidas en el modelo y no como una determinación absoluta de la vida real del componente.

Esta precisión resulta especialmente importante porque el modelo de fatiga empleado en la investigación no incorporó de manera simultánea la reducción progresiva del espesor ocasionada por el desgaste abrasivo. La propia investigación reconoce que ambos fenómenos pueden presentarse simultáneamente durante el funcionamiento de la herramienta y que esta interacción podría modificar la estimación de vida obtenida. Por tanto, el valor aproximado de cuatro meses debe interpretarse como una vida útil estimada bajo las condiciones de carga consideradas, constituyendo además una oportunidad para futuros trabajos que integren en un mismo modelo el daño por fatiga y la pérdida progresiva de material ocasionada por abrasión.

Al aplicar los criterios de ingeniería establecidos, la hipótesis general quedó respaldada descriptivamente: las cuatro probetas de tracción fallaron en el metal base y no en la unión soldada; la velocidad promedio de desgaste de la zona soldada fue 25,7 % menor que la del metal base; y la condición crítica simulada presentó un factor de seguridad de 1,172 y un daño acumulado aproximado de 74 % a los 45502 ciclos, inferior a la condición de falla definida por el 100 % de daño. La evidencia microestructural y los resultados de impacto y dureza complementaron esta valoración. Por ello, el procedimiento con acero T-500, alambre EL-12 y fundente R35Mo se considera técnicamente viable para las herramientas evaluadas, dentro de las condiciones experimentales y numéricas del estudio, sin que ello implique su validación para todas las condiciones reales de operación.

CONCLUSIONES

La recuperación de las herramientas de corte mediante soldadura por arco sumergido (SAW), utilizando acero antidesgaste T-500, alambre EL-12 de 3,2 mm y fundente R35Mo que según los resultados de ensayos de tracción se alcanzó una resistencia promedio de 1014,5 MPa y una elongación promedio de 68,25 %, lo que evidencia la factibilidad técnica obtener una unión con comportamiento mecánico favorable.

La respuesta frente al impacto presentó valores entre 123 y 125 J, con una energía promedio absorbida de 124,13 J con variación mínimas entre las probetas, adicional la dureza mostró valores comprendidos entre 69,2 y 621,7 HV, evidenciando datos heterogéneos en los puntos evaluados, por otro lado, la zona recuperada presentó una mayor resistencia al desgaste abrasivo respecto al metal base. La velocidad promedio de desgaste disminuyó de 0,01400 g/min en el metal base a 0,01040 g/min en la zona soldada, representando una reducción aproximada del 25,7 %. Este resultado constituye uno de los principales indicadores experimentales obtenidos con el procedimiento SAW frente a condiciones abrasivas.

En el análisis de fatiga se estimó con 45 502 ciclos de trabajo y aproximadamente 61 447 ciclos para alcanzar el 100 % de daño acumulado. Bajo las condiciones de carga solicitadas, la región crítica alcanzó aproximadamente 74 % de daño a los 45 502 ciclos y se obtuvo un factor de seguridad mínimo de 1,172 para la condición crítica. Asimismo, la vida útil de la herramienta recuperada fue estimada en aproximadamente cuatro meses; este valor debe interpretarse como una predicción bajo las condiciones establecidas en el modelo, debido a que el efecto simultáneo del desgaste abrasivo no fue incorporado en el análisis de fatiga.

En conjunto, los hallazgos respaldan descriptivamente la hipótesis general y muestran que la recuperación mediante SAW es técnicamente viable, bajo las condiciones ensayadas y simuladas, para reutilizar las herramientas de corte evaluadas. Para la ingeniería, el aporte principal consiste en integrar evidencia metalúrgica, mecánica, tribológica y estructural en un criterio de decisión sobre la recuperación de componentes. Para la industria de mantenimiento de maquinaria pesada, este enfoque ofrece una base técnica para evaluar la recuperación frente al reemplazo inmediato, con potencial para prolongar el aprovechamiento de las piezas y reducir el consumo de repuestos y los tiempos de indisponibilidad. Su aplicación industrial debe acompañarse de control de calidad del procedimiento, seguimiento en servicio y validación del efecto combinado del desgaste y la fatiga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balos, S., Labus Zlatanović, D., Janjatović, P., Pećanac, M., Erić Cekić, O., Rosić, M., & Stopić, S. (2025). Microstructure, hardness, and wear behavior of layers obtained by electric arc hardfacing processes. *Materials*, 18(2), 299. <https://doi.org/10.3390/ma18020299>
- Florea, V. A., Toderas, M., & Tihanov-Tănăsache, D. (2025). Influence of abrasive wear on reliability and maintainability of components in quarry technological equipment: A case study. *Applied Sciences*, 15(7), 3603. <https://doi.org/10.3390/app15073603>
- Hao, J., & Que, H. (2026). The effect of heat treatment temperature on the wear resistance of 42CrMo steel hardfacing with Fe–Cr–C alloy. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 13, 100235. <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2026.100235>
- Küçükoner, H., Karakoç, H., & Kahraman, N. (2020). Investigation of microstructure and mechanical properties of AISI2205/DIN-P355GH steel joint by submerged arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 566–586. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.023>
- Luo, K., Yang, X., He, J., Lu, J., Ai, X., Luo, Z., & Luo, F. (2026). Tailoring high-temperature wear resistance of PTAW Ni–WC coatings: The critical role of WC type in microstructural optimization and properties design. *Surface & Coatings Technology*, 530, 133530. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2026.133530>

- McLaughlin, E., & Mehmanparast, A. (2026). Fatigue life prediction of as-welded steel structures using phase-field modelling: The role of material properties and weld geometry. *Engineering Failure Analysis*, 197, 111126. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2026.111126>
- Mohammadi, A. A., Wang, Z., & Teng, H. (2025). Mechanical and metallurgical assessment of a submerged arc welded surfaced rail. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 19, 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2024.09.003>
- Mohammadi, H., Eslami, A., Bahrami, A., & Saeidi, N. (2025). Effect of heat treatment on crack growth resistance of 420NiMo hard-faced coating applied on DIN 21CrMoV5-11 steel substrate using submerged arc welding (SAW). *Journal of Materials Research and Technology*, 39, 4913–4923. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.10.093>
- Muangjunburee, P., Oo, H. Z., Abd Rahim, S. Z., & Srikarun, B. (2025). Abrasive wear performance of repair welds on R260 rail using different welding electrodes. *Results in Engineering*, 26, 104680. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104680>
- Ning, Y., Qiu, Z., Wu, B., Pan, Z., & Li, H. (2025). Hardfacing of metals: A review of consumables, properties and strengthening processes. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 6330–6349. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.04.221>
- Oo, H. Z., & Muangjunburee, P. (2018). Wear behaviour of hardfacing on 3.5% chromium cast steel by submerged arc welding. *Materials Today: Proceedings*, 5, 9281–9289.
- Prysyazhnyuk, P., Paliichuk, I., Prysiashniuk, A., Marynenko, S., Huryk, O., Khomyk, N., & Koval, I. (2026). Microstructure and hardness of high-manganese steel coatings reinforced with molybdenum carbide (Mo₂C). *Procedia Structural Integrity*, 81, 552–557. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2026.03.094>
- Singh, A., & Singh, R. P. (2020). A review of effect of welding parameters on the mechanical properties of weld in submerged arc welding process. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1714–1717. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.361>

- Singh, A. B., Singh, S., Dangayach, G. S., Meena, M. L., & Kumar, M. (2026). Comparative study of SAW and ASAW process on ASTM A709 Grade 36 steel welds. *Materials Today: Proceedings*, 118, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.052>
- Xue, K., Ma, Y., Shi, J., & Nie, J. (2025). Development and performance evaluation of high-value SJ101 submerged arc welding flux from solid waste steel slag. *Structures*, 80, 109842. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109842>
- Zahiri, R., Sundaramoorthy, R., Lysz, P., & Subramanian, C. (2014). Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding. *Surface & Coatings Technology*, 260, 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.076>