

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE
LA REDUCCIÓN DE DIÁMETRO DEL
PROCESO DE ESTIRADO DEL ACERO EN
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL
PRODUCTO FINAL**

(Determination of the influence of diameter
reduction in the steel drawing process on the
mechanical properties of the final product.)

Para acceder al Título de

Graduado/a en Ingeniería Química

Autor: Ana García Cabrero
Director: Carlos Thomas García
Codirector: Borja Arroyo Martínez

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	2
1.1	INTRODUCCIÓN: EL ACERO Y LA INDUSTRIA METALÚRGICA	2
1.2	LA ECONOMÍA CIRCULAR; EJEMPLO EN EL GRUPO CELSA	3
1.3	OBJETIVO	4
2	ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1	PROCESO DE OBTENCIÓN DE ACERO POR COLADA CONTINUA	7
2.2	PROCESO DE CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA.....	9
2.2.1	<i>Laminación del acero mediante tren de laminación en GSW</i>	11
2.2.2	<i>Trefilado o estirado en frío</i>	12
3	MATERIALES Y METODOLOGÍA	16
3.1	MATERIALES PROPUESTOS	16
3.1.1	<i>Aceros de fácil mecanización o free cutting</i>	16
3.1.2	<i>Aceros de cementación</i>	18
3.2	METODOLOGÍA.....	20
3.2.1	<i>Recopilación y toma de muestras</i>	20
3.2.2	<i>Ensayo de tracción</i>	21
3.2.3	<i>Variables experimentales obtenidas</i>	23
3.2.4	<i>División por tamaños</i>	24
3.2.5	<i>Análisis de datos</i>	24
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	26
4.1	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FÁCIL MECANIZACIÓN O <i>FREE CUTTING</i>	26
4.1.1	<i>Influencia del diámetro en la resistencia mecánica obtenida.</i>	29
4.1.2	<i>Influencia de la reducción de diámetro en la resistencia mecánica obtenida.</i>	31
4.1.3	<i>Análisis de la ganancia obtenida</i>	33
4.2	CEMENTACIÓN.	39
4.2.1	<i>Influencia del diámetro en la resistencia mecánica obtenida</i>	40
4.2.2	<i>Influencia de la reducción de diámetro</i>	42
4.2.3	<i>Análisis de la ganancia obtenida</i>	44
5	PRESUPUESTO Y PLAZO DE EJECUCIÓN	50
5.1	COSTE DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO Y PÉRDIDAS	50
5.2	COSTE DE MANO DE OBRA	50
5.3	RESUMEN DEL PRESUPUESTO	51
5.4	PLAZO DE EJECUCIÓN.....	51
6	CONCLUSIONES Y PROSPECCIÓN DE FUTURO	53
6.1	CONCLUSIONES	53
6.1.1	<i>Fácil mecanización o free cutting</i>	54
6.1.2	<i>Cementación</i>	55
6.2	PROSPECCIÓN DE FUTURO	57
7	BIBLIOGRAFÍA.....	58

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción: El acero y la industria metalúrgica

La industria metalúrgica se centra en la elaboración del acero y metales no ferrosos y en el procesamiento de metales.

El acero es un material indispensable para la sociedad hoy en día, su presencia en diversos sectores lo convierte en uno de los materiales más prácticos para la sociedad a nivel global. Se encuentra presente en todas las estructuras modernas, en las infraestructuras dedicadas al transporte y en numerosos productos y medios de transporte, como vehículos, instrumentos quirúrgicos y electrodomésticos.

Destaca como material por sus numerosas y diversas características, ya que es un material que se encuentra en gran disponibilidad, es resistente y duradero y su alta maleabilidad permite su transformación en diferentes productos y útiles, convirtiéndolo en un material muy versátil en la actualidad, gracias a sus cuantiosas propiedades mecánicas y químicas [1] [2]

Se define el acero como una aleación compuesta principalmente de hierro y carbono, ambos componentes presentes en la corteza terrestre. El acero se presenta en numerosas calidades, dependiendo de la cantidad y variedad de elementos químicos aleantes que contenga, entre los cuales destacan por su abundancia el manganeso, cromo, níquel, silicio, molibdeno y vanadio. La proporción y cantidad de dichos elementos aleantes varía drásticamente las propiedades del acero, obteniendo así diversas calidades aptas para distintos y variados tipos de aplicación. Además de esto, sus posteriores tratamientos termo-mecánicos confieren al acero propiedades mecánicas aún más específicas, como son su resistencia a la corrosión, desgaste, tenacidad, plasticidad, maquinabilidad y resistencia a tracción, entre otras [3].

Su uso extendido se debe a diversos factores; la alta disponibilidad o reciclabilidad de sus componentes, su facilidad a ser conformado y/o

mecanizado, los bajos coste económicos y energéticos ligados a su producción y sus altas tasas de recuperación y reciclabilidad [2].

Los aceros se clasifican, en función de los elementos que conforman la aleación, principalmente en:

- Aceros al carbono. Este grupo representa la mayoría de los aceros, presentando en su estructura en torno un 0,60 % de silicio y cobre y un máximo de 1,65 % de manganeso. Se subclasifican en función de su porcentaje de carbono en aceros de bajo contenido en carbono ($C < 0,25\%$) y aceros de alto contenido en carbono ($C > 0,25\%$) [3]
- Aceros aleados. Al igual que los aceros al carbono, los aceros aleados presentan en gran proporción manganeso, silicio y cobre, pero además contienen proporciones de cromo, níquel, vanadio, molibdeno, cobre, y azufre, entre otros. Destacan en este grupo los aceros inoxidable, aquellos que presentan un alto contenido en cromo, de aproximadamente entre un 15% y un 20% y proporciones de níquel también elevadas entre el 8% y 12% [3].

1.2 La economía circular; ejemplo en el grupo CELSA

El proceso productivo del acero está cada vez más focalizado en el reciclaje de la chatarra y la consecución de una economía circular lo más eficiente posible, minimizando el consumo energético y el desperdicio a la vez que se consiguen materiales capaces de satisfacer mejores estándares. El acero ha facilitado la introducción de este modelo gracias a su alta reciclabilidad puesto que mantiene sus propiedades y su reciclaje reduce en un 90% el consumo de materia prima [2].

Un ejemplo de ello a nivel europeo lo constituyen las empresas que conforman el grupo Celsa, que se basa en la economía circular, con tasas de reciclaje llegando a ser incluso del 100%, y una recirculación de productos y materias primas dentro de las empresas del grupo. Esto tiene como consecuencia la

disminución de residuos acumulados en vertederos y proporciona una segunda vida al producto, además de un ahorro en costes de transporte, y por consiguiente de emisiones de CO₂.

El modelo circular y sostenible del grupo no solo proporciona las ventajas ya mencionadas, si no que resulta además en un ahorro de consumo energético de 13700 GWh , 14M de metros cúbicos de agua, 10M de toneladas de CO₂ y evita un consumo de en torno a 11M de metros cúbicos de recursos naturales.

Paralelo a la implantación de la circularidad del modelo económico del grupo, se desarrolla un objetivo de descarbonización completa del proceso productivo, siendo hoy en día, una empresa de bajas emisiones de CO₂, debido al uso de hornos de arco eléctrico para la producción de acero [4].

1.3 Objetivo

El objetivo del presente trabajo podría definirse como la determinación de la influencia de la reducción de diámetro del proceso de estirado del acero en las propiedades mecánicas del producto final.

Este proyecto se lleva a cabo dentro del Grupo Celsa, un conglomerado internacional de empresas dedicadas a la producción de acero y a la obtención de productos derivados, líder en su sector. En concreto, la empresa en la cual se realiza el marco del proyecto es Global Bright Bars (GBB), una división dedicada a la producción de barras calibradas de alta calidad que se destinan, principalmente, a la industria de la automoción.

En este contexto el objetivo principal del proyecto es la determinación, a partir del análisis de datos experimentales, de la reducción de diámetro precisada para cumplir con las características mecánicas requeridas para las barras calibradas finales, a partir de las barras de alambón empleadas como materia prima, con sus propiedades mecánicas y diámetro iniciales.

Dicho análisis resulta de gran interés, ya que permitirá definir los procesos de fabricación de barra calibrada en función de los requisitos del cliente, consiguiendo así una producción basada en el conocimiento previo de resultados del producto final. Hasta el momento esta tarea se realiza en base a la experiencia y a correcciones mediante iteraciones por operaciones sucesivas o secundarias si el resultado previsto no es conseguido de forma inmediata. Así este trabajo en base al conocimiento anticipado, evitará operaciones intermedias y garantizará el cumplimiento de los requerimientos de manera eficaz y directa.

Como objetivos secundarios, los resultados que se obtengan aportarán información adicional al know-how de la empresa, relacionando su proceso de producción con las propiedades mecánicas de los productos finales y las materias primas, permitiendo a su vez la creación de una base de datos más completa y útil para el control de calidad de la producción.

En conclusión, el objetivo del proyecto se centra en fijar estándares de ganancia de resistencia mecánica en los aceros de la familia denominada *free cutting* dentro del proceso productivo de estirado en frío, y fortalecer con ello el know-how y la base de datos experimentales existente. Los objetivos anteriores se llevarán a cabo mediante:

- En primer lugar, la realización de una selección de materias primas de alambrón con diferentes composiciones químicas de acero. Se analizarán productos obtenidos con diferente reducción de diámetro que provengan de dos diferentes líneas de producción del proceso de estirado en frío, y se analizarán sus propiedades mediante ensayos de tracción y de dureza. El trabajo se centrará en el análisis de la familia de aceros denominada *free cutting* o de fácil mecanización y aceros de cementación.
- Sobre los materiales seleccionados se realizará un estudio de la influencia del porcentaje de reducción de diámetro del alambrón en los parámetros previamente mencionados con el fin de obtener un estándar del proceso de estirado en función de las propiedades mecánicas requeridas por el cliente. Concretamente se analizará el porcentaje de reducción de

diámetro frente a la resistencia mecánica y frente a la ganancia de resistencia mecánica del acero.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Proceso de obtención de acero por colada continua

Como se ha mencionado previamente, el proceso de producción del acero por colado continuo se trata de un proceso circular, que comienza con la recogida de residuos metálicos de distintas industrias y empresas y termina en la laminación del acero producido en la fundición de éstos; este proceso es muy diferente a la fundición por lotes que también se realiza en el sector.

En primer lugar, se procede al procesado o preparación de la chatarra metálica, la materia prima de la producción del acero. La chatarra es adquirida a proveedores certificados y bajo unas especificaciones técnicas de compra. Tras su recepción, se realiza una inspección al 100% del lote de chatarra recibido, para proceder a su limpieza y tratado, previo a una clasificación de ésta según su calidad y composición. Antes de comenzar el proceso de fundición se eliminan las impurezas y se ajusta la composición química según los requisitos del acero final, un semiproducto de acero denominado palanquilla. La carga metálica de cada lote de colada es controlada mediante selección selectiva de la chatarra y un aporte de pellets de mineral prerreducido, controlando así los elementos residuales, como el cromo, nitrógeno, cobre, molibdeno y estaño, que pueden influir en la composición final del acero. Además de chatarra y elementos prerreducidos, pueden añadirse al proceso ferroaleaciones, carburantes y escorificantes [5].

Tras el tratamiento y recepción de la chatarra, ésta se conduce a la acería, la cual cuenta con tres subdivisiones, según la instalación y según la parte del proceso llevado a cabo en ellas.

El primer tratamiento de la materia prima se realiza en el horno de arco eléctrico. Tras un precalamiento con quemadores de gas, la carga de chatarra introducida en el horno se funde junto al resto de componentes adicionales que conforman la composición del lote de colada.

Se trata de un tipo de horno de arco eléctrico (**Ilustración 1**), que realiza la fundición del acero mediante el aporte de energía eléctrica. El fundamento de su funcionamiento se basa en el arco eléctrico generado entre los electrodos de grafito del horno y el propio material mediante contacto directo, lo que genera el calor necesario para fundir la chatarra metálica en acero líquido. Tras el precalentamiento de la materia prima, los electrodos del horno descienden para entrar en contacto con el material férreo, la fusión comienza al conectar el sistema a la corriente [5].

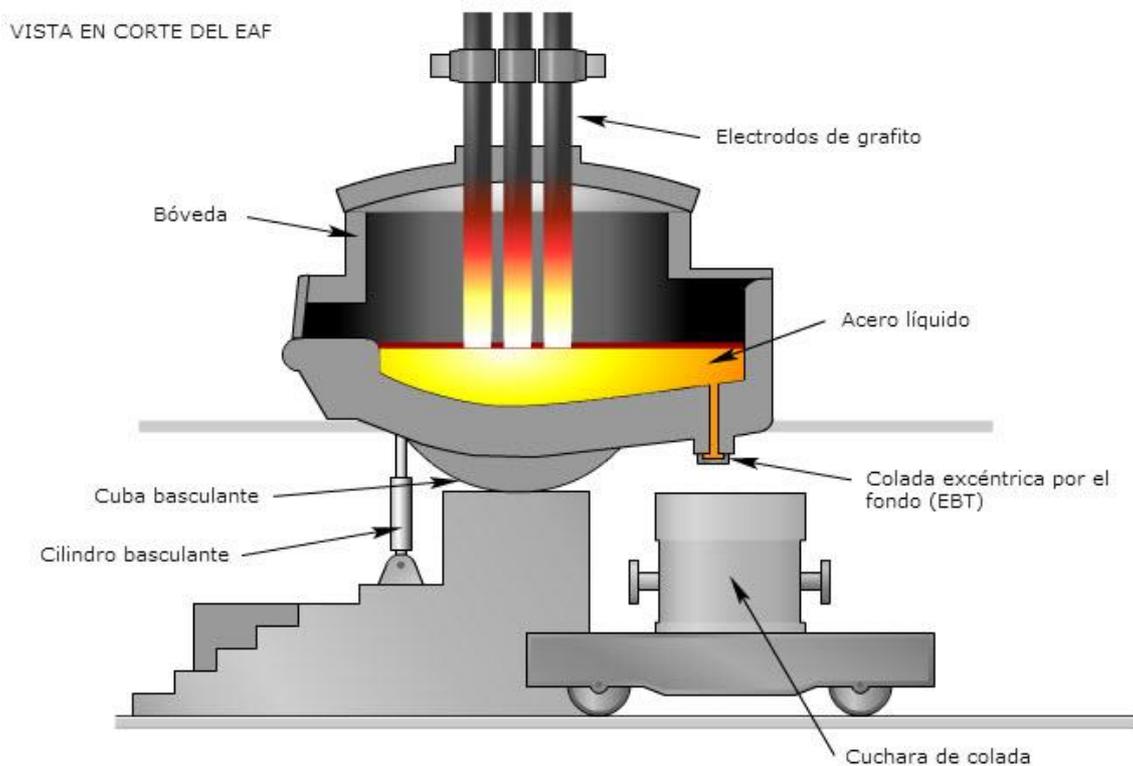


Ilustración 1. Esquema de un horno de arco eléctrico [6]

El horno se compone de tres partes; solera, cuba y bóveda, todas ellas con un revestimiento de material refractario y con un sistema de refrigeración acoplado. La instalación se completa con un transformador de potencia, un sistema hidráulico que permite el movimiento de los elementos durante el transcurso del proceso, circuitos de refrigeración y aire comprimido, un sistema de extracción de gases y transportador para la colada denominado cuchara [7].

Cuenta además con un sistema EBT de colada por el fondo, que impide la salida de escoria del proceso [5].

A lo largo del transcurso del proceso se realizan controles de composición química de la colada para su ajuste mediante la adición de elementos requeridos para alcanzar la composición objetivo, marcada por las propiedades mecánicas y químicas requeridas para el producto de acero, además mediante la inyección de gas inerte se produce la homogenización del bruto de colada y se eliminan los gases producidos durante el proceso mediante vacío.

El proceso llevado a cabo en el horno de arco eléctrico termina con el vertido del acero líquido en el transportador de cuchara, donde se conduce a la siguiente parte del proceso. En esta etapa del proceso productivo se realiza un tratamiento de la escoria derivada del proceso del horno de arco eléctrico, se añaden elementos aleantes para el ajuste de la composición química, se retiran las inclusiones de la base de la cuchara y se realiza un ajuste de temperatura por calentamiento del acero mediante una batería de tres electrodos, con el fin de llegar al óptimo de temperatura requerida para la siguiente parte del proceso; la colada continua.

Tras alcanzar la composición química y la temperatura deseada, el acero líquido se vierte en la máquina de colada continua para su solidificación secuencialmente controlada tras su paso por una matriz de refrigeración con un sistema de control automático de velocidad-temperatura. El producto de acero solidificado se obtiene en palanquillas de sección cuadrada.

2.2 Proceso de conformado por deformación plástica

Tras la obtención de la palanquilla, la misma es deformada para ir transformando en una geometría intermedia ya más cercana al alambrón final que se desee conseguir. Esto se realiza mediante la aplicación de procesos de deformación plástica, en frío o en caliente, tales como pueden ser la forja, la laminación o el trefilado.

Los procesos de conformación por deformación plástica se consideran procedimientos de carácter mecánico aplicados a materiales con el fin de producir cambios en su forma, dimensiones o comportamiento mediante la

aplicación de esfuerzos externos que produzcan una mejora en las propiedades mecánicas del material, así como en su acabado superficial. A nivel industrial los procesos de conformación plástica destacan por sus posibilidades de reproductibilidad y la capacidad de obtención de productos con buen acabado superficial y con estrechas tolerancias dimensionales, incluso sin la necesidad de implementar operaciones de mecanizado posteriores.

Los materiales metálicos en estado sólido presentan una estructura cristalina que se ve alterada durante los procesos de conformado. Los esfuerzos externos aplicados al material producen una alteración del equilibrio de la red cristalina de átomos metálicos, lo que provoca movimientos internos en la estructura del material que resultan en deformaciones tanto elásticas, como plásticas, siendo éstas últimas el objetivo de interés de la industria metalúrgica [8].

Los procesos de conformación por deformación plástica se realizan tanto con o como sin aporte externo de calor, el caso de estudio se centrará en aquellos llevados a cabo en frío, es decir, a una temperatura por debajo de la temperatura de cristalización del material, evitando así cambios en su estructura cristalina.

Pese a que no existe un aporte directo de calor, indirectamente se genera durante el proceso debido a los esfuerzos de fricción entre el equipo y el material, por lo cual se produce un efecto de la temperatura en el material deformado en frío. Las técnicas de deformación por estirado en frío requieren de un gran aporte de energía en forma de trabajo, que se disipará durante el proceso en forma de calor desprendido y en una acumulación de energía interna en la estructura atómica del material [9].

2.2.1 Laminación del acero mediante tren de laminación en GSW

La última etapa del proceso de fabricación del alambón es la laminación, se trata de una deformación plástica del semiproducto de acero bruto obtenido, tras el procesado de la materia prima por colada continua, llevada a cabo en los denominados trenes de laminación. Mediante este proceso se obtiene un producto final denominado alambón y productos laminados de acero [10].

El proceso de laminación comienza con la palanquilla como materia prima inicial. En primer lugar, la palanquilla es calentada en un horno de largueros galopantes previo a la etapa de desbaste, puesto que el proceso ha de realizarse a elevadas temperaturas para facilitar la deformación plástica del acero.

Una vez calientes las palanquillas se hacen circular a través de un tren desbastador de hilo horizontal y vertical que mediante la acción de unos rodillos reduce el grosor y aumenta la longitud de la palanquilla, lo que será la forma y dimensiones iniciales previas a su entrada al tren de laminación. La operación de desbaste reduce la temperatura de la palanquilla, por lo que se requiere nuevamente de un calentamiento superficial mediante un transferidor y unas bobinas de inducción, lo que favorecerá el ablandamiento para su posterior conformado.

Tras esta operación, el proceso continúa en función del diámetro final deseado;

Para diámetros pequeños (generalmente entre 5 y 24 mm) el material se introduce en un tren preparador intermedio conformado por cilindros de fundición nodular, el material es transportado a través de una batería de rodillos de tungsteno para continuar con un despunte mediante la acción de corte de unas tijeras automáticas. Posteriormente, el alambón alcanza el diámetro deseado con una tolerancia en ovalidad de ± 10 mm, tras su paso por el Reducing Sizing Mill. Los aceros de diámetros grandes (generalmente comprendidos entre 25 y 52 mm) se realizan habitualmente en una línea distinta a aquellos de menor diámetro por cuestiones operativas [5].

El proceso de laminación de diámetros de mayor magnitud se realiza a altas temperaturas, en torno a los 800° C, por lo que el tren intermedio empleado para estos aceros dispone de cajas de agua para refrigeración. Se realiza un despunte mediante tijeras automáticas y se ajusta la tolerancia en ovalidad con el Bar Reducing Sizing Mill.

Las líneas cuentan con su propia desbobinadora y sistemas de ventilación para el enfriamiento de los rollos. Para finalizar el material pasa por un proceso de enfriamiento mediante sistemas de aporte agua y aire, con el fin de estabilizar la microestructura del acero y mejorar sus propiedades mecánicas de forma controlada, además de favorecer su manipulación.

Posteriormente a su fabricación, el acero puede someterse a distintas operaciones de acabado; se realizan decapados para la eliminación de impurezas, recubrimientos superficiales según las especificaciones de producto final, cortes a medias o tratamientos térmicos para modificar sus propiedades mecánicas como los recocidos.

Adicionalmente, el producto puede pasar por procesos de deformación en frío, objeto del proyecto, para mejorar notablemente su acabado superficial y aumentar en magnitud sus propiedades mecánicas, que serán detalladas a continuación y a lo largo del documento [5].

2.2.2 Trefilado o estirado en frío

El trefilado o estirado en frío se considera una tecnología/técnica de conformado por deformación plástica empleada para la obtención de barras calibradas. Consiste en la reducción de las dimensiones de una barra o alambre debido a la deformación plástica producida al forzar su introducción mediante un mecanismo denominado hilera, en una matriz con un diámetro fijado inferior al inicial.

Para la producción de barras de acero calibradas se parte de alambón de acero bobinado como materia prima, éste se somete a un proceso de estirado en frío para obtener una barra con un diámetro inferior al inicial y con unas propiedades mecánicas distintas, a saber; resistencia mecánica a tracción, resistencia

elástica y dureza. Concretamente, el parámetro de resistencia mecánica se incrementa debido a los esfuerzos de compresión entre la barra y el útil de reducción de diámetro al traccionar ésta para que circule a través de él, produciendo así una deformación plástica en el acero.

En el proceso de conformado por deformación plástica en frío se produce un endurecimiento por deformación, denominado también acritud. Los materiales con un tamaño de grano fino presentan mayor resistencia debido a un mayor número de límites de grano. Los cristales se reorientan en la posición que más favorezca su deslizamiento, lo que resulta en un alargamiento en la misma dirección de la deformación. Por lo tanto, el grado de deformación de un material influirá en un incremento de su tamaño de grano y por lo tanto de su resistencia.

Las propiedades del material tales como la resistencia a tracción, el límite elástico y la dureza se ven afectadas por la deformación plástica resultante del proceso de conformado, incrementando sus valores. De manera inversa, otras características como la ductilidad, conductividad eléctrica y resistencia a corrosión disminuyen.

Estas barras presentan, además de un cambio en sus propiedades mecánicas, una gran mejoría en su acabado superficial, respecto a la materia prima inicial.

La deformación plástica de la barra se debe a los esfuerzos de compresión resultantes durante su paso por el orificio de la hilera, donde se produce la reducción de diámetro y a los esfuerzos de tracción aplicados para forzar su circulación a lo largo de la línea de estirado, donde se realiza un ajuste dimensional de la barra a medida que la barra avanza por la matriz.

En primer lugar, se desbobina el rollo de alambón con una devanadora doble, una vez desenrollado el alambón se transporta mediante un autómat a partir del enganche de la punta, la cual se introduce en una máquina de torneado de puntas para facilitar su introducción en el sistema de estirado. Posteriormente el acero pasa por un proceso de pre-enderezado, que tiene lugar en un enderezador horizontal y en otro vertical, para romper así la memoria del material

y evitando que recupere la disposición curva con la que entra en el proceso de fabricación como materia prima.

Como proceso intermedio, el alambón se introduce en una granalladora para la eliminación de la calamina, una capa superficial de material presente en los rollos que puede resultar perjudicial para el material a lo largo del proceso de estirado. Mediante un sistema *Push Pointing* se introduce de forma hidráulica la punta de del rollo de alambón en la hilera donde se lleva a cabo el proceso de estirado; una vez introducida, se fuerza su paso mediante unos carros de estirar a través de la hilera, mecanismo que fija el diámetro de la barra.

Posterior al proceso de estirado, y análogo al pre-enderezado, la barra de acero se endereza en un sistema de rodillos verticales para favorecer la rotura de la memoria del material una vez conformado. Se garantiza la calidad del material obtenido en el proceso gracias a un equipo de detección *Eddy Current*, que consiste la aplicación de una corriente estática y rotativa para la detección al 100% del material, eliminando del proceso aquellas barras que presentes defectos superficiales que no cumplan con las especificaciones permitidas por norma. Posteriormente, se elimina el magnetismo adquirido a consecuencia de la exposición a corrientes inducidas por parte del equipo de detección, mediante su introducción en un desimantador.

Complementario al proceso de enderezado vertical, se introduce el producto en otro enderezador, en este caso horizontal, con el fin de romper la memoria del material en dicha dirección.

Tras finalizar el proceso productivo se sucederán las operaciones de acabado del producto final, se cortará la barra bajo especificaciones solicitadas por el cliente mediante un sistema de corte en frío. Una vez cortadas continuarán el proceso de acabado introduciéndose en una pulidora mediante un sistema de guía. Se somete a la barra a un enderezado y pulido llevado a cabo por dos rodillos hiperbólicos que actúan a presión y fricción sobre la barra. En la denominada bancada de salida, las barras ya calibradas salen del sistema de producción. Opcionalmente, a elección del cliente, la barra pasa por un último

proceso de acabado en el cuál mediante una chaflanadora se mejora el acabado del corte de la barra gracias a la acción de unos cabezales que chaflan los extremos de la barra.

3 MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1 Materiales propuestos

3.1.1 Aceros de fácil mecanización o free cutting

Los aceros de fácil mecanización se clasifican como aceros de baja aleación ya que únicamente presenta un elemento metálico en su composición, el manganeso, y sólo en algunos casos, plomo. Además del carbono y el manganeso, los aceros de fácil mecanización se componen principalmente de silicio, fósforo y azufre, en distintas proporciones, dependiendo de su aplicación.

Los aceros analizados en este estudio son en concreto, los aceros 11SMn30 y 11SMnPb30, cuya composición viene detallada en la **Tabla 1** fragmento de la Tabla A.2. del Anexo A: *Tipos de aceros y composición química (análisis de colada) de aceros calibrados de fácil mecanización (sólo como información-composición química como se enumera en la Norma EN ISO 683-4)*, perteneciente a la norma *UNE-EN 10277:2019, Anexo A, Calidades de los aceros y composición química de acuerdo con las normas EN ISO 683-1, EN ISO 683-3 y EN ISO 683-4.*

Tabla 1. Composición química de aceros de fácil mecanización fragmento de la UNE-EN 10277:2019, Anexo A, Tabla A.2 [11][12][13][14].

Tipo de acero		% fracción másica ^a					
Designación simbólica	Designación numérica	C	Si	Mn	P	S	Pb
Aceros no destinados al tratamiento térmico							
11SMn30	1.0715	0,14	0,05 ^b	0,90 a	0,11 ^c	0,27 a	-
11SMnPb30	1.0718			1,30		0,33	0,20 a 0,35

^a Valores máximos a menos que se indique lo contrario.

^b Ya que el silicio tiene un efecto adverso sobre la mecanización, no se añade intencionalmente hasta los límites especificados, pero si la formación de óxidos especiales está garantizada, puede acordarse un contenido del Si del 0,10% al 0,40%.

° En el momento de solicitar la oferta y hacer el pedido, puede acordarse de que deben suministrarse tanto una calidad con un 0,06% a 0,11% de P o una calidad con un máximo de 0,05% de P.

3.1.1.1 Influencia del azufre en la maquinabilidad del acero, interés de aplicación del tipo de acero.

Los aceros de fácil mecanización también se denominan resulfurados, ya que se les añade azufre, en torno a un 0,10% y plomo, en aproximadamente un 0,30% de fracción másica, con el fin de mejorar su maquinabilidad. La combinación del azufre con el manganeso presente en la composición de este tipo de aceros da lugar a sulfuros de manganeso, mejorando un 1% su maquinabilidad por cada 3 milésimas de azufre en fracción másica añadidas.

Por otro lado, la adición de plomo genera una dispersión de inclusiones de polvo metálico que recubren las moléculas de sulfuro de manganeso, provocando un efecto lubricante que reduce los esfuerzos de fricción resultantes de los procesos de mecanizado, debido a una disminución de la superficie de contacto entre la herramienta empleada y la viruta del material. El efecto de añadir plomo y sulfuro de manganeso en la dentro de la matriz metálica de ferrita resulta en un notable alargamiento de la vida útil de las herramientas y equipos de mecanizado y mejora el índice de maquinabilidad en torno a un 20-30 % (Documento interno de trabajo, Santander, 2023).

Las aplicaciones de los aceros de fácil mecanización son principalmente la fabricación de piezas de mecanizado, juntas y conexiones hidráulicas y sistemas de inyección.

A continuación, la **Tabla 2** muestra los valores de características mecánicas que han de presentar los aceros de fácil mecanización según la UNE-EN 10277:2019.

Tabla 2. Características mecánicas de aceros calibrados de fácil mecanización (excepto aceros para temple y revenido) fragmento de la UNE-EN 10277:2019 [11][12][13][14]

Tipo de acero		Espesor t mm	Características mecánicas		
Designación simbólica	Designación numérica		Estirado en frío (+C)		
			R _{p0,2} MPa mín.	R _m MPa	A mín.
Aceros no destinados al tratamiento térmico					
11SMn30 11SMnPb30	1.0715 1.0718	5 ≤ t ≤ 10	440	510 a 810	6
		10 < t ≤ 16	410	490 a 760	7
		16 < t ≤ 40	375	460 a 710	8

3.1.2 Aceros de cementación

Los aceros de cementación se caracterizan por tener un bajo contenido en carbono, y por ser aceros aleados, en concreto, los aceros analizados serán aceros aleados al cromo.

Los aceros analizados en este estudio son en concreto, los aceros 16MnCr5 y 16MnCrS5, cuya composición viene detallada en la **Tabla 3**, fragmento de la Tabla A.3. del Anexo A: *Tipos de aceros y composición química (análisis de colada) de aceros cementados (sólo como información- composición química como se enumera en la Norma EN ISO 683-3)*, perteneciente a la norma UNE-EN 10277:2019, Anexo A, *Calidades de los aceros y composición química de acuerdo con las normas EN ISO 683-1, EN ISO 683-3 y EN ISO 683-4.*

Tabla 3. Composición química de aceros de cementación fragmento de la UNE-EN 10277:2019, Anexo A, Tabla A.2 [11][12][13][14].

Tipo de acero		% fracción másica ^{a,b}						
Designación simbólica	Designación numérica	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
16MnCr5	1.7131	0,14	0,15	1,00	0,025	0,035	0,80	0,40
16MnCrS5	1.7139	a	a	a		0,020 a	a	
		0,19	0,40	1,30	0,040	1,10		

^a Valores máximos a menos que se indique lo contrario.

^b Los aceros de con mecanización mejorada tanto por niveles de azufre superiores a unos 0,10% S (incluyendo morfología del sulfuro controlada) o adiciones de plomo pueden estar disponibles bajo petición. En el primer caso, el límite superior para el contenido de Mn puede incrementarse en un 0,15%.

3.1.2.1 Influencia cementación

Los aceros de cementación se suelen destinar a un posterior tratamiento térmico de temple y revenido con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, puesto que la dureza del material viene determinada por su porcentaje de carbono, estos materiales suelen enriquecerse en carbono mediante su adición en forma de gas en un horno. Las durezas superficiales obtenidas tras este proceso suelen ser muy elevadas, superando los 60 HRC (Documento interno de la empresa, Santander, 2023).

Las aplicaciones de los aceros cementados suelen ser para la producción de piezas que serán sometidas a esfuerzos de fatiga, choque o flexión, ya que gracias a su capa cementada presentan una buena resiliencia. En concreto, se destinan sobre todo a la fabricación de émbolos y engranajes.

A continuación, la **Tabla 4** muestra los valores de características mecánicas que han de presentar los aceros de fácil mecanización según la UNE-EN 10277:2019.

Tabla 4. Características mecánicas de aceros calibrados de cementación (excepto aceros para temple y revenido) fragmento de la UNE-EN 10277:2019 [11][12][13][14]

Tipo de acero		Espesor t mm	Características mecánicas	
Designación simbólica	Designación numérica		+A+ estirado en frío (+A+C) Dureza ^b HBW máx.	+FP+ estirado en frío (+FP+C) Dureza ^b HBW
Aceros no destinados al tratamiento térmico				
16MnCr5	1.7131	5 ≤ t ≤ 10	260	-
16MnCrS5	1.7139	10 < t ≤ 16	250	-
		16 < t ≤ 40	245	140 a 240

3.2 Metodología.

3.2.1 Recopilación y toma de muestras

El análisis de resultados se realiza, por un lado, con un histórico de muestras analizadas previamente y con una posterior continuación de toma de muestras con el fin de completar dichos análisis previos.

Se cuenta con un total de 114 muestras analizadas, tras descartar el resto de calidades no incluidas en este proyecto, se realiza una selección de 52 muestras de *Free Cutting* y 26 muestras de *Cementación*, con unos diámetros correspondientes a un rango entre 11 y 40 mm, para el análisis de resultados, descartando las muestras que no presenten fiabilidad en los resultados obtenidos por discrepancias en las magnitudes derivadas de ensayos fallidos o por pérdida de trazabilidad de las muestras, evitando así deducciones erróneas que puedan afectar a las conclusiones finales del proyecto.

En conclusión, se realiza el estudio analizando únicamente muestras con una trazabilidad completa cuyos ensayos mecánicos se hallan realizado correctamente, obteniendo así resultados fiables que permitan obtener conclusiones robustas acerca del comportamiento de las muestras.

Para los ensayos se requiere de 450 mm de muestra, por lo cual, se cortan, mediante cizalla, las barras obtenidas, puesto que las barras producidas se fabrican a mayores longitudes. Se toman dos probetas para cada muestra recogida; una de ellas para ensayar y la restante se almacena, para poder realizar un segundo ensayo en el caso de incidencias o resultados incongruentes.

3.2.2 *Ensayo de tracción*

Los resultados expuestos en este estudio se basan en los resultados obtenidos al realizar ensayos de tracción a las muestras previamente seleccionadas.

El ensayo de tracción es una prueba mecánica realizada para determinar las propiedades de resistencia mecánica a tracción y reducción de área de un material, en este caso de distintos tipos de acero. Consiste en la aplicación gradual de una carga sobre el eje longitudinal de la muestra para medir su deformación a lo largo del tiempo y en función de la carga aplicada hasta alcanzar aquella que corresponda con la rotura de ésta. Las fuerzas de tracción que actúan sobre la muestra durante el ensayo son el resultado del esfuerzo interno del material provocado por la acción de dos fuerzas ejercidas en sentido opuesto en las caras perpendiculares al eje longitudinal de la probeta.

En función de la máquina empleada para realizar el ensayo se preparan las probetas a ensayar teniendo en cuenta su geometría, su adaptabilidad a la máquina y la norma aplicada, si así lo requiere el ensayo. Normalmente, son muestras cilíndricas o probetas con sección rectangular, pero también se puede realizar sobre piezas mecanizadas como ensayo de control de calidad.

La muestra se coloca en la máquina de ensayo de tracción sujeta con dos mordazas y normalmente se realiza una medida de las dimensiones iniciales. A medida que transcurre el ensayo se toman muestras continuas de la deformación de la muestra mediante un instrumento de medición denominado extensómetro. Se registran los valores de deformación plástica de la muestra, o límite elástico, para determinar a que valor de carga el comportamiento de la deformación es de carácter elástico, es decir, la muestra o probeta recuperan sus dimensiones

originales, o plástico, cuando se producen deformaciones de carácter permanente.

Los parámetros obtenidos al finalizar el ensayo serán aquellos a los cuales la probeta experimente una rotura, obteniendo así el valor de carga máxima que podrá soportar el material antes del fallo y la deformación total producida desde el inicio de la región de deformación práctica hasta el punto de fractura de la muestra. Indirectamente, mediante comparación de mediciones se pueden obtener parámetros de reducción de área y elongación de la muestra.

En conjunto, todos los parámetros obtenidos con el ensayo de tracción dan información acerca de la resistencia y ductilidad del material ensayo y se aplican en el diseño y selección de materiales en función de su aplicación práctica.

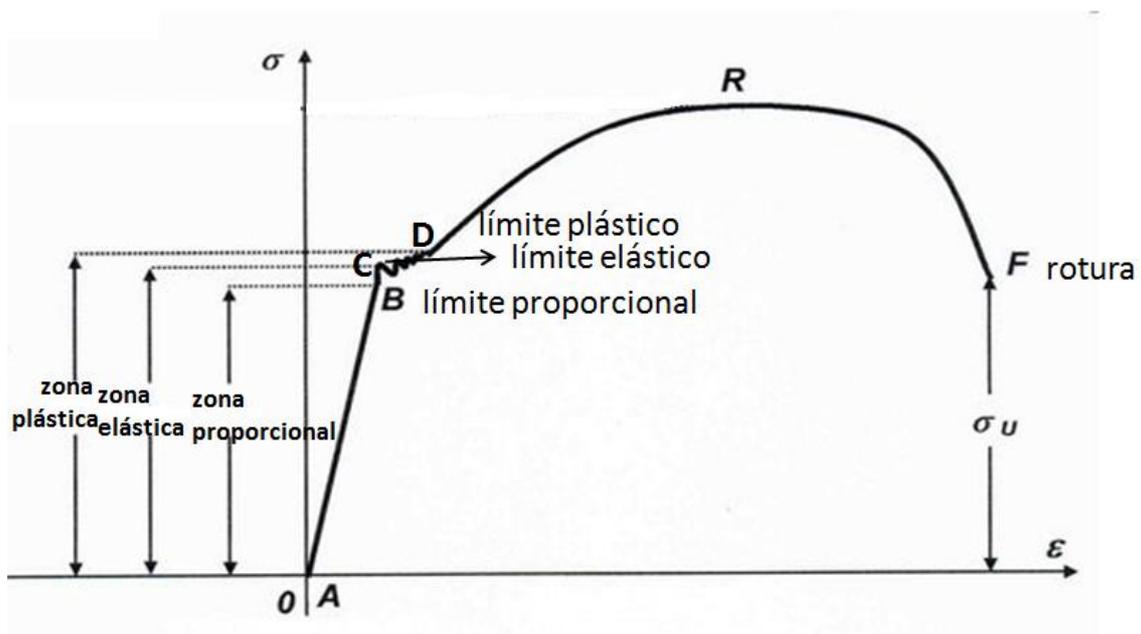


Figura 1. Curva tensión-deformación teórica estándar [15].

La **Figura 1** muestra los resultados del ensayo de tracción de forma gráfica, en concreto, la relación entre la tensión aplicada al material y la deformación resultante, representando a lo largo de la curva obtenida las distintas zonas de transición por las que pasa el material antes de alcanzar su rotura.

3.2.3 Variables experimentales obtenidas

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción son el límite elástico del material, su resistencia a tracción y el alargamiento en rotura.

- I. Durante el ensayo de tracción las cargas a las que es sometido el material provocan su deformación elástica, es decir, no sufre ninguna alteración dimensional permanente, se estira debido a los esfuerzos de tracción aplicados y recupera su forma inicial al cesar la aplicación de la carga. Se define el límite elástico del acero como la propiedad del acero que expresa la tensión máxima que puede soportar el material sin experimentar una deformación plástica permanente [16].

- II. Se define la resistencia a tracción como una propiedad mecánica del acero que determina la capacidad de resistencia de éste a sufrir una deformación permanente o su rotura debido a la acción de fuerzas de tracción. Se cuantifica como la carga máxima soportada por el material durante el ensayo de tracción antes de experimentar una deformación plástica que derive en la rotura de la probeta de ensayo [16]. Esta propiedad depende del tipo de acero y de su composición y se ve afectada por su proceso de fabricación y por los tratamientos térmicos que haya experimentado.

Tanto el límite elástico como la resistencia a tracción se expresan en unidades de presión, en concreto los resultados obtenidos se muestran cuantificados en megapascuales (MPa). Ambas propiedades resultan ser muy útiles en el campo de la ingeniería estructural e industrial, puesto que permiten el diseño de equipos y estructuras en función de las cargas y tensiones a soportar, garantizando mediante los cálculos de diseño que se evite el fallo o deformación de dichos equipos, estructuras e instalaciones.

- III. Se define el alargamiento como el incremento de longitud experimentado por una muestra de material a causa de la acción de fuerzas de tracción. La medida obtenida en el ensayo se determina elongación y tiene como

base de cálculo la longitud inicial de la muestra previa al ensayo. Normalmente se determinan valores de elongación permanente tras la ruptura como porcentaje de la longitud inicial de la muestra [16].

3.2.4 División por tamaños

El análisis de los datos obtenidos se lleva a cabo mediante una clasificación de los resultados en función del rango de tamaño del diámetro de la materia prima, es decir, del alambión.

En la **Tabla 5** se muestran los rangos numéricos en milímetros (mm) y su designación correspondiente en diámetros medios, diámetros gruesos y diámetros tipo “Garret”. Esta última clasificación se realiza en función del método de producción de cada rango de acero y pertenece a la organización interna de la empresa.

Tabla 5. Clasificación por diámetros de las barras.

Diámetros Medios [mm]	Diámetros Gruesos [mm]	Diámetros Garret [mm]
[11-16]	(16-24)	(24-37)

3.2.5 Análisis de datos

A partir de los datos obtenidos experimentalmente a través de la realización de ensayos de las muestras recogidas, se realiza un análisis de los resultados mediante la determinación indirecta de variables tales como la reducción de área y la ganancia en resistencia mecánica de las barras.

Para determinar la reducción de área experimentada por el alambión de define su sección transversal;

$$A_{transversal} = \pi r^2$$

Se determina la reducción de área, o su equivalente, la reducción de diámetro mediante la siguiente expresión [16];

$$red \ \phi = \frac{\phi_i - \phi_f}{\phi_i} \cdot 100 \quad [\%]$$

Se define la ganancia como la cuantificación del incremento de magnitud de la resistencia mecánica tras pasar por el proceso de estirado;

$$Ganancia = Rm_{final} - Rm_{inicial} \quad [MPa]$$

Donde;

ϕ_i – Diámetro inicial del alambre [mm].

ϕ_f – Diámetro final de la barra [mm].

Rm – Resistencia mecánica [MPa].

Estas variables fijan los estándares para el análisis de los datos obtenidos, realizando una comparación de resultados en función de la reducción de área producida en el alambre y la ganancia obtenida tras el proceso de estirado.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tracción realizados a las barras de calidades *free cutting* y cementación.

4.1 Resultados de los ensayos de fácil mecanización o *free cutting*.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de tracción en muestras de fácil mecanización o *free cutting* seleccionados para la realización del proyecto. Los resultados obtenidos se dividen por clasificación según diámetro en las **Tablas 6, 7 y 8**.

Tabla 6. Variables obtenidas y parámetros del ensayo de tracción en barras de diámetro medio

\varnothing alambión [mm]	Rm Alambión [MPa]	\varnothing barra calibrada [mm]	Reducción de \varnothing [%]	Rm Barra calibrada [MPa]	Ganancia Rm [MPa]	Ganancia Rm [%]
17	407	16	11,4	511	104	26%
17	423	16	11,4	513,6	90,6	21%
18	429	17	10,8	467	38	9%
19	447	18	10,2	544	97	22%
19	439	18	10,2	505	66	15%
19	438	18	10,2	485	47	11%
20	426	19	9,8	500	74	17%
21	412	20	9,3	507	95	23%
21	434	20	9,3	527	93	21%
22	445	21	8,9	544	99	22%
23	395	21,3	14,2	561	166	42%
24	426	22	16,0	576	150	35%
24	412	22	16,0	536	124	30%
24	427	22	16,0	525	98	23%
24	430	22	16,0	541	111	26%

Tabla 7. Variables obtenidas y parámetros del ensayo de tracción en barras de diámetro grueso.

∅ alambrón [mm]	Rm Alambrón [MPa]	∅ barra calibrada [mm]	Reducción de ∅ [%]	Rm Barra calibrada [MPa]	Ganancia Rm [MPa]	Ganancia Rm [%]
17	407	16	11,4	511	104	26%
17	423	16	11,4	513,6	90,6	21%
18	429	17	10,8	467	38	9%
19	447	18	10,2	544	97	22%
19	439	18	10,2	505	66	15%
19	438	18	10,2	485	47	11%
20	426	19	9,8	500	74	17%
21	412	20	9,3	507	95	23%
21	434	20	9,3	527	93	21%
22	445	21	8,9	544	99	22%
23	395	21,3	14,2	561	166	42%
24	426	22	16,0	576	150	35%
24	412	22	16,0	536	124	30%
24	427	22	16,0	525	98	23%
24	430	22	16,0	541	111	26%

Tabla 8. Variables obtenidas y parámetros del ensayo de tracción en barras de diámetro tipo Garret

∅ alambrón [mm]	Rm Alambrón [MPa]	∅ barra calibrada [mm]	Reducción de ∅ [%]	Rm Barra calibrada [MPa]	Ganancia Rm [MPa]	Ganancia Rm [%]
25	417	24	7,8	461	44	11%
26	432	24	14,8	524	92	21%
27	400	25	14,3	466	66	17%
27	412	25	14,3	509	97	24%
28	417	26	13,8	482	65	16%
28	419	26	13,8	478	59	14%
29	411	27	13,3	523	112	27%
30	407	28	12,9	520	113	28%
32	409	30	12,1	490	81	20%
32	425	30	12,1	490,2	65,2	15%
34	421	32	11,4	596	175	42%
34	425	32	11,4	544	119	28%
34	409	32	11,4	472,6	63,6	16%
34	420	33	5,8	500	80	19%
34	417	33	5,8	447,1	30,1	7%
36	424	34	10,8	503,4	79,4	19%
36	406	34	10,8	520,4	114,4	28%
37	425	35	10,5	597	172	40%
37	412	35	10,5	555	143	35%
37	415	35	10,5	557	142	34%
37	402	35	10,5	466	64	16%

4.1.1 Influencia del diámetro en la resistencia mecánica obtenida.

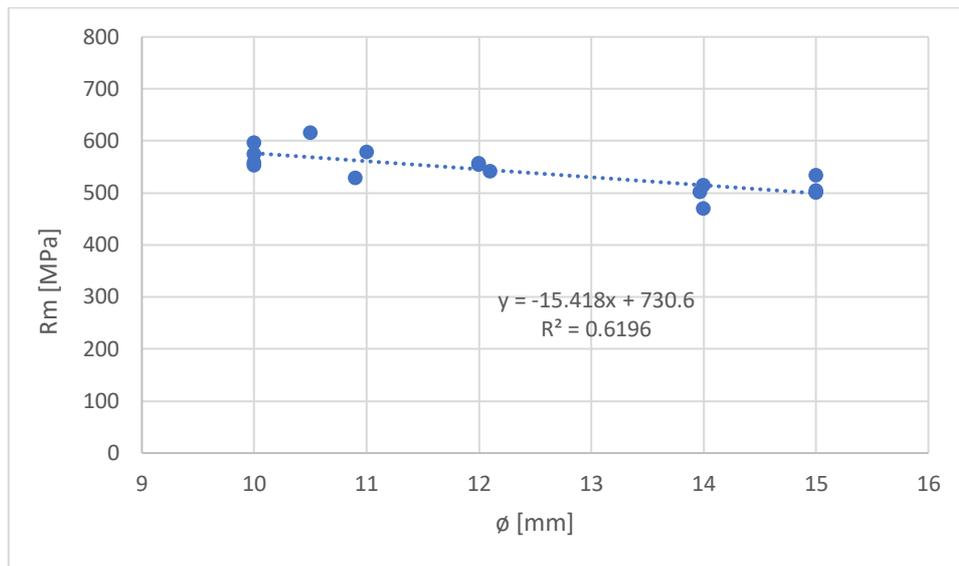


Figura 2. Resistencia mecánica en función del diámetro en barras de diámetro medio.

En la **Figura 2**, se observa un decrecimiento de la resistencia mecánica según aumenta el diámetro de la barra para diámetros medios. Se pueden aproximar los datos mediante una correlación lineal con un índice de linealidad medio, considerando la aproximación como aceptable.

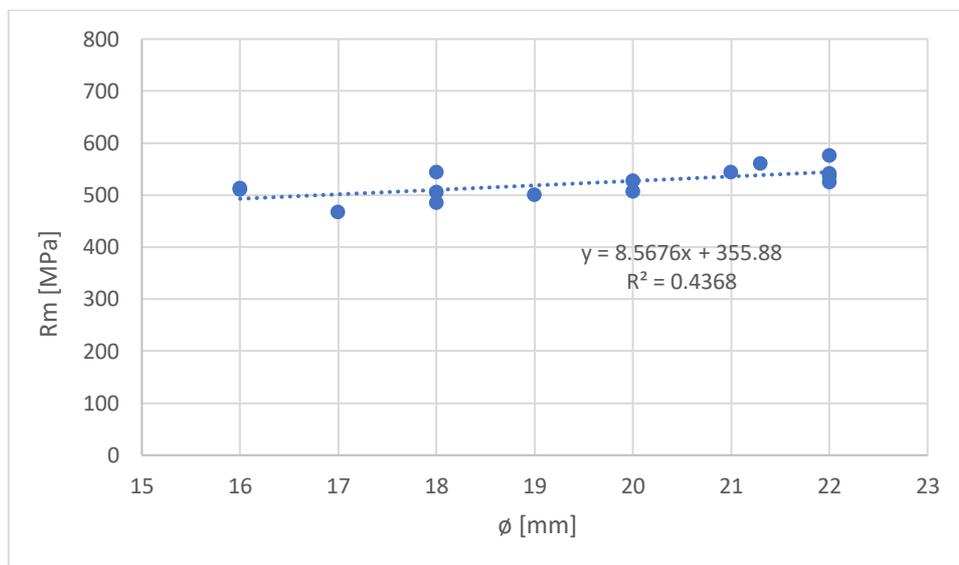


Figura 3. Resistencia mecánica en función del diámetro en barras de diámetro grueso.

Sin embargo, la tendencia en la **Figura 3** es opuesta, a mayores diámetros de barras consideradas gruesas, los valores de resistencia mecánica aumentan. En comparación con los resultados mostrados en la **Figura 2**, la linealidad de los datos disminuye en este rango de diámetros.

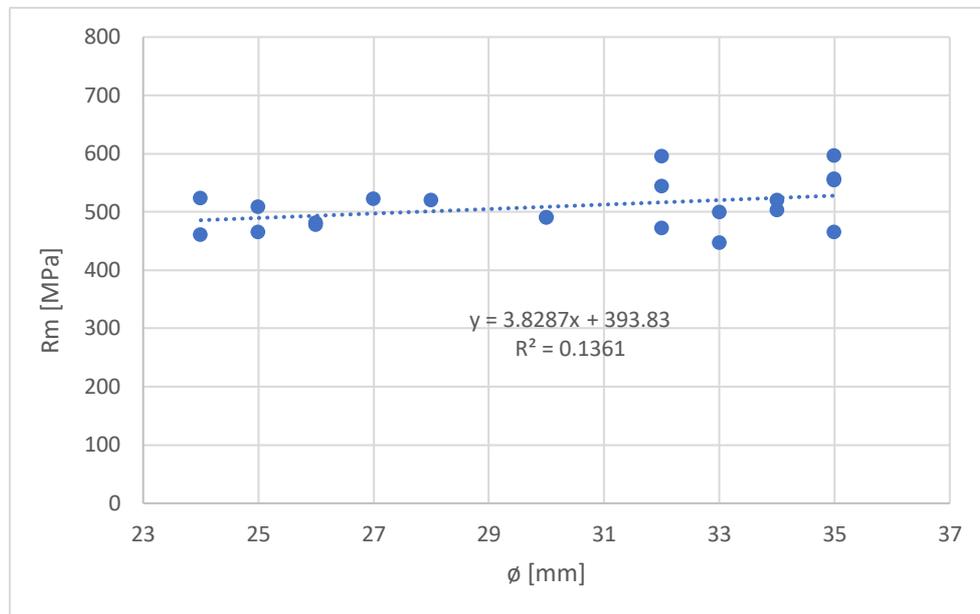


Figura 4. Resistencia mecánica en función del diámetro en barras de diámetro tipo Garret.

Las barras clasificadas según el valor de su diámetro en Garret muestran en la **Figura 4** una tendencia similar a aquellas de diámetros gruesos, diferenciándose en un menor incremento de la resistencia mecánica en función del diámetro, siendo la pendiente de la gráfica menor que la de la **Figura 3**. Se observa una notable pérdida de linealidad al representar los datos, obteniendo un coeficiente de correlación lineal bajo, que muestra poca consistencia en la relación de ambos parámetros.

4.1.2 Influencia de la reducción de diámetro en la resistencia mecánica obtenida.

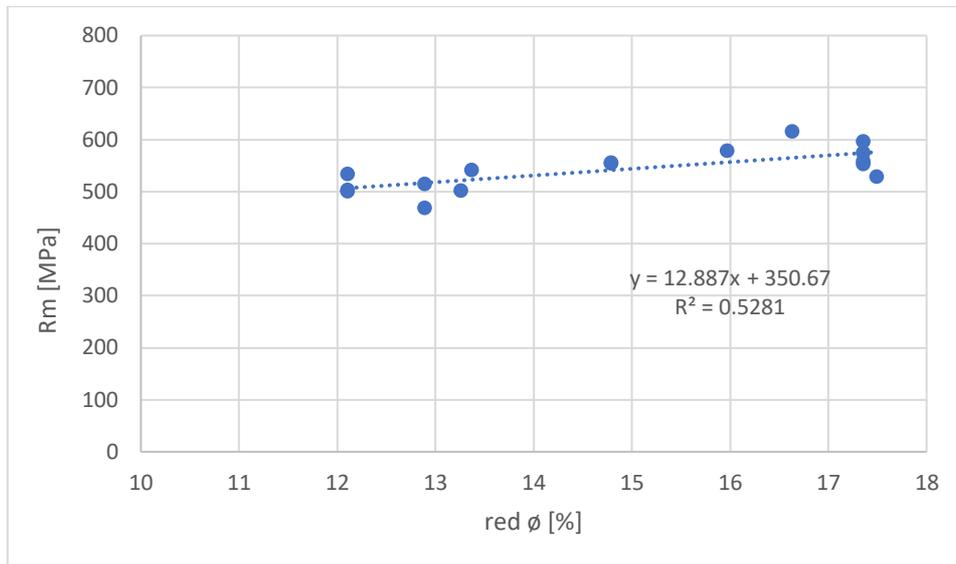


Figura 5. Resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro medio.

La **Figura 5** muestra la relación entre la resistencia mecánica obtenida y la reducción de diámetro que ha experimentado cada una de las muestras. Se observa una tendencia lineal positiva, con un incremento de la resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro, guardando un coeficiente de correlación lineal medio con tendencia baja.

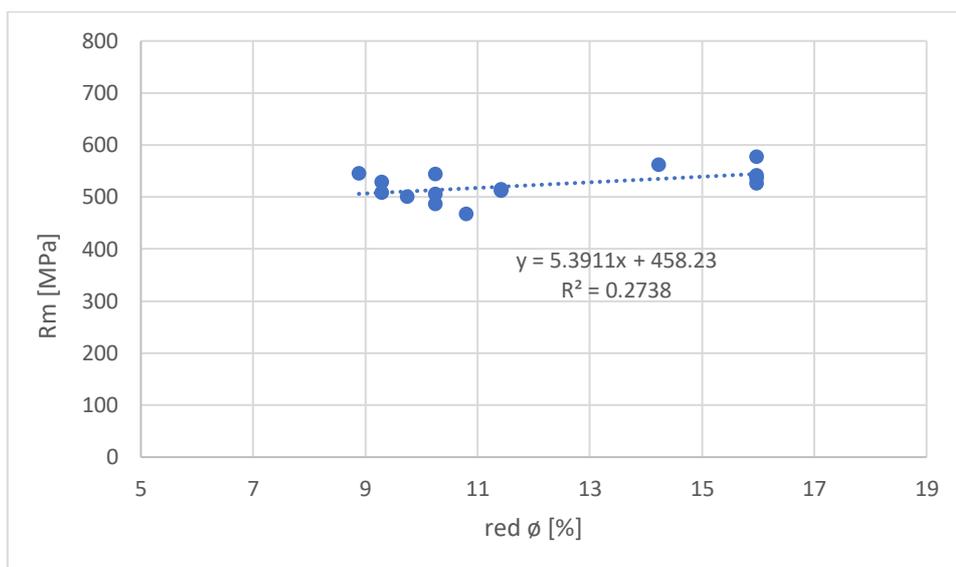


Figura 6. Resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro grueso.

La **Figura 6** representa la relación entre la resistencia mecánica y la reducción de diámetro de las barras con diámetro grueso. Se muestra la misma tendencia que en la **Figura 5**, sin embargo, el carácter lineal de la relación entre variables es más débil y la variación de la resistencia mecánica, representada por la pendiente, es menor.

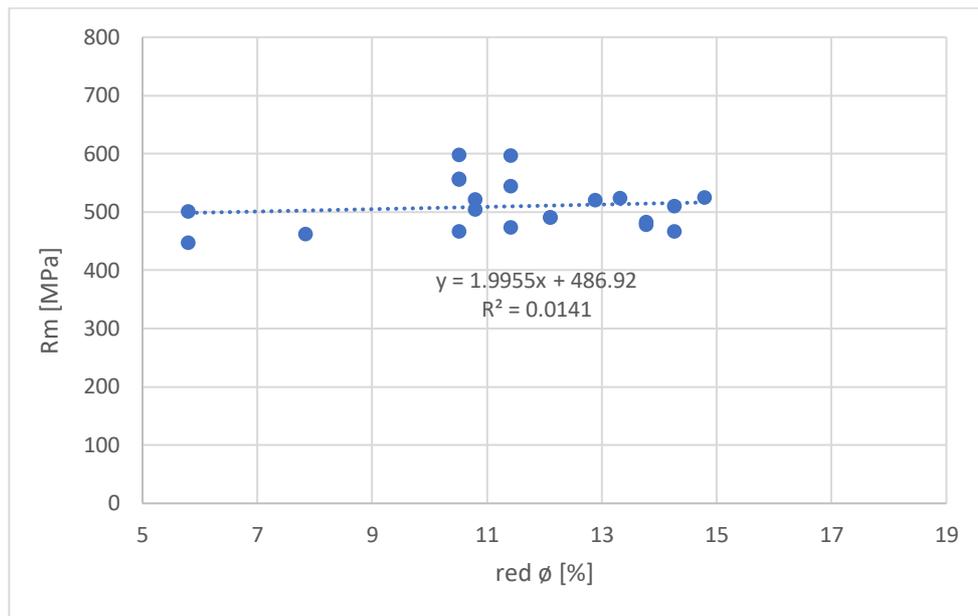


Figura 7. Resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro tipo Garret.

La representación de datos de resistencia mecánica frente a reducción de diámetro para barras de diámetro tipo *Garret* representada en la **Figura 7**, muestra una tendencia con una linealidad muy baja, en la cual, se observa un ligero aumento de la resistencia mecánica a medida que crece la reducción de diámetro de las barras.

4.1.3 Análisis de la ganancia obtenida

4.1.3.1 Análisis de la ganancia obtenida en función del diámetro

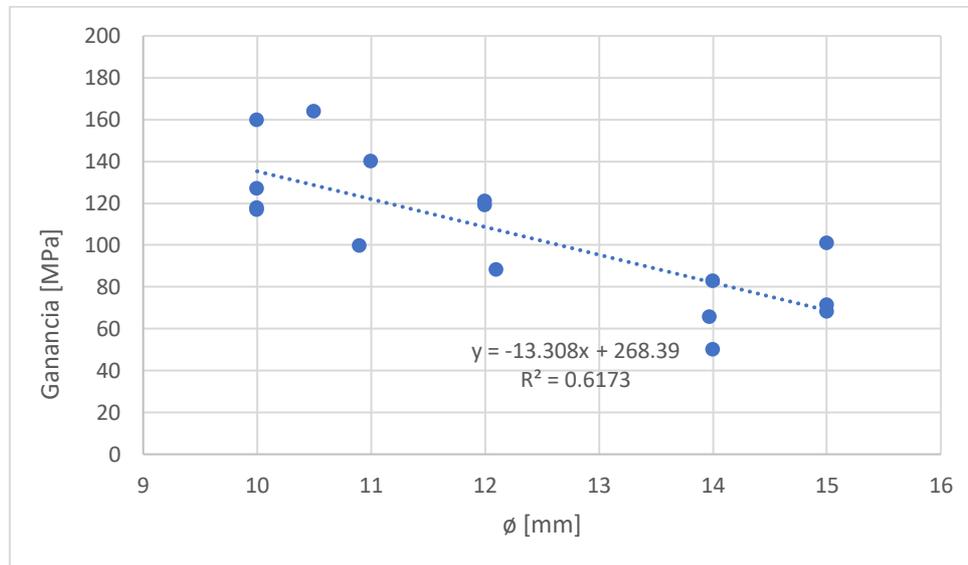


Figura 8. Ganancia en resistencia mecánica en función del diámetro en barras de diámetro medio

Al representar la ganancia de resistencia mecánica de las muestras de diámetro medio se observa una tendencia regresiva de esta variable a medida que aumenta el diámetro de la barra. Se obtienen resultados de ganancia alta para las barras de menor diámetro (**Figura 8**).

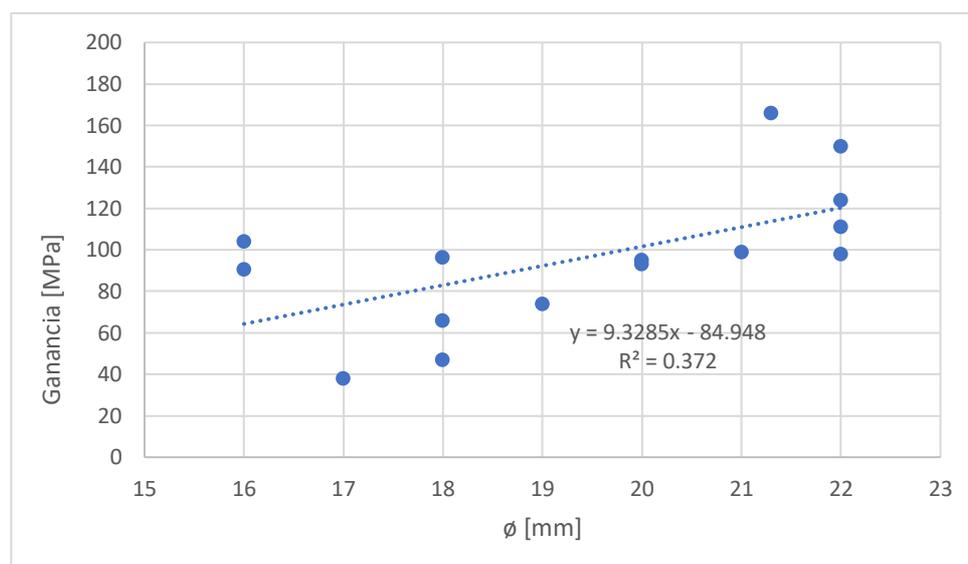


Figura 9. Ganancia en resistencia mecánica en función del diámetro en barras de diámetro grueso.

Por el contrario, la **Figura 9**, que representa la ganancia obtenida frente al diámetro para barras de diámetro grueso, presenta una tendencia progresiva del aumento de ganancia en función del diámetro. Cabe recalcar que los datos obtenidos para las barras de diámetros gruesos guardan menor linealidad que aquellas de diámetro medio.

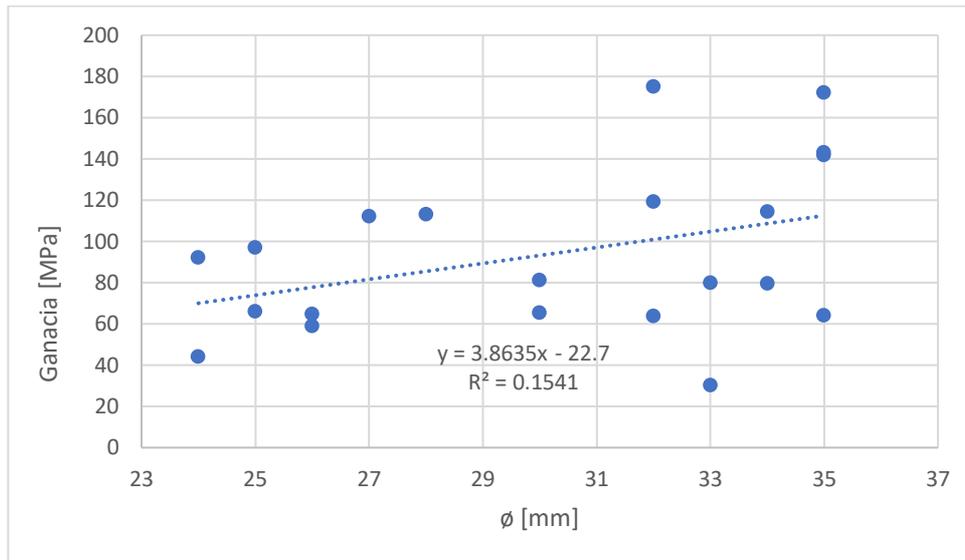


Figura 10. Ganancia en resistencia mecánica en función del diámetro en barras de diámetro tipo Garret.

Por último, al representar las muestras de barras tipo “Garret” (**Figura 10**), no se observa una tendencia lineal clara, obteniendo una recta con un coeficiente de regresión lineal bajo. La pérdida de linealidad al aumentar el diámetro se ratifica también en este caso, al compararlo con los demás rangos representados.

4.1.3.2 Análisis de la ganancia obtenida en función de la reducción de diámetro

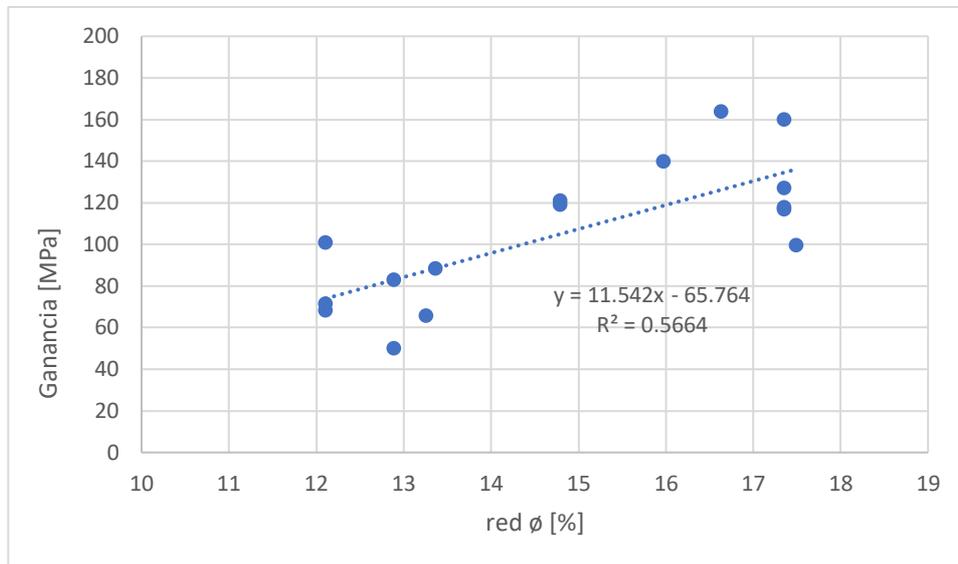


Figura 11. Ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro medio.

La **Figura 11** representa los datos de ganancia en resistencia mecánica frente a la reducción de diámetro sufrida por las barras de diámetros medios. Se observa un aumento de la ganancia en resistencia mecánica de la barra según se aumenta la reducción de diámetro a la cual se somete la barra.

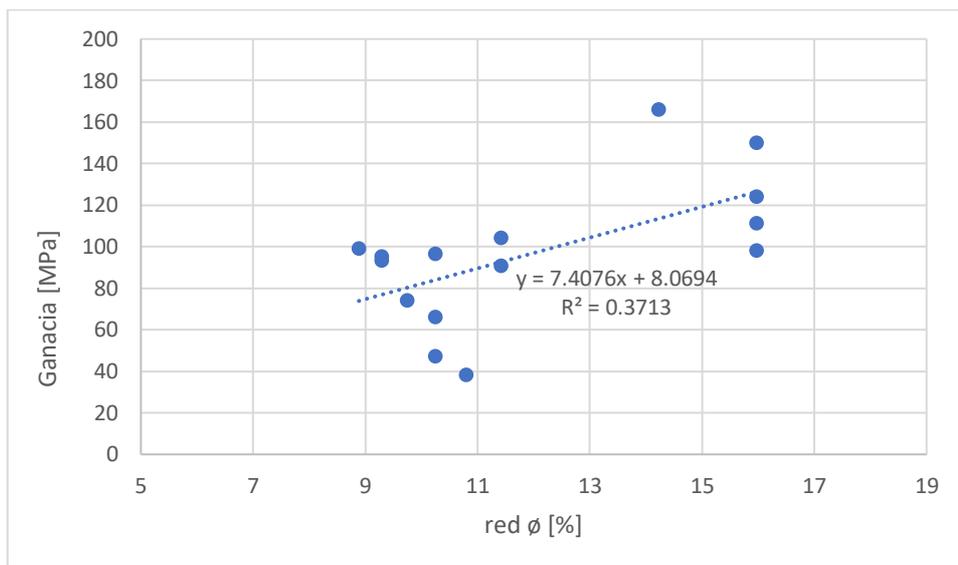


Figura 12. Ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro grueso

Para barras con diámetros gruesos, cuyos datos de ganancia y reducción de diámetros quedan representados en la **Figura 13**, la tendencia obtenida entre las variables es la misma que aquella observada en la figura 12. Como se ha podido observar en los casos ya mencionados, se produce una pérdida de linealidad en comparación con los resultados obtenidos para diámetros medios.

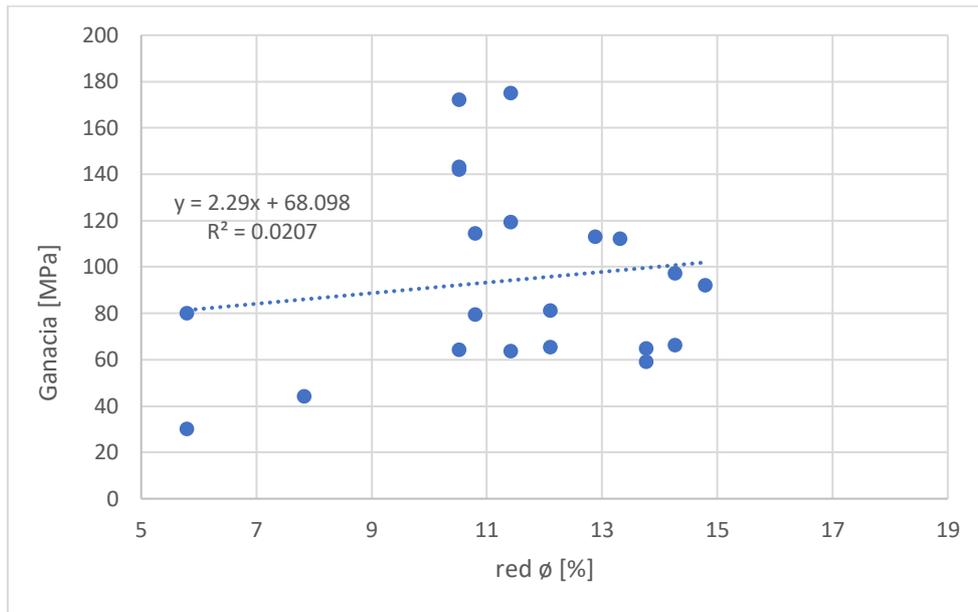


Figura 13. Ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro tipo Garret

A pesar de tener la misma tendencia positiva, los resultados de barras con diámetro Garret representados en la **Figura 15**, apenas guardan relación lineal entre ellos. Se pueden observar resultados más dispersos que en el resto de rangos de diámetros.

A continuación, las **Figuras 16, 17 y 18** representan los porcentajes de ganancia frente al porcentaje de reducción de diámetro para las barras de diámetro medio, grueso y tipo *Garret*, respectivamente.

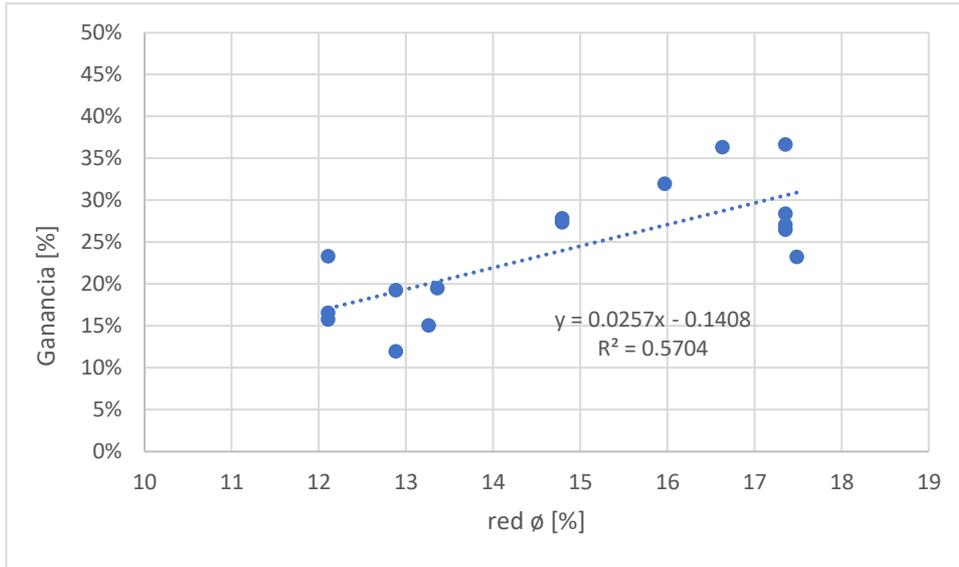


Figura 14. Porcentaje de ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro medio.

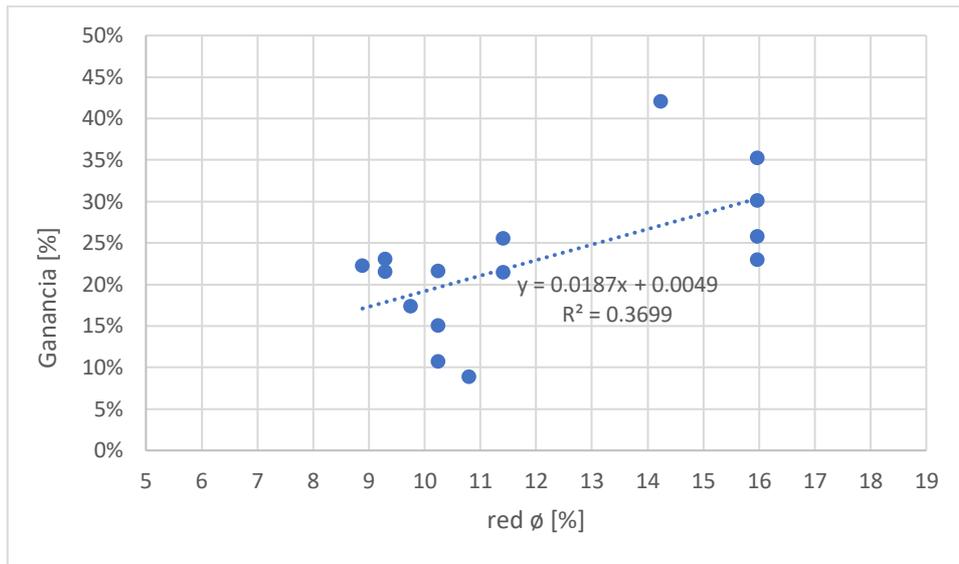


Figura 15. Porcentaje de ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro grueso

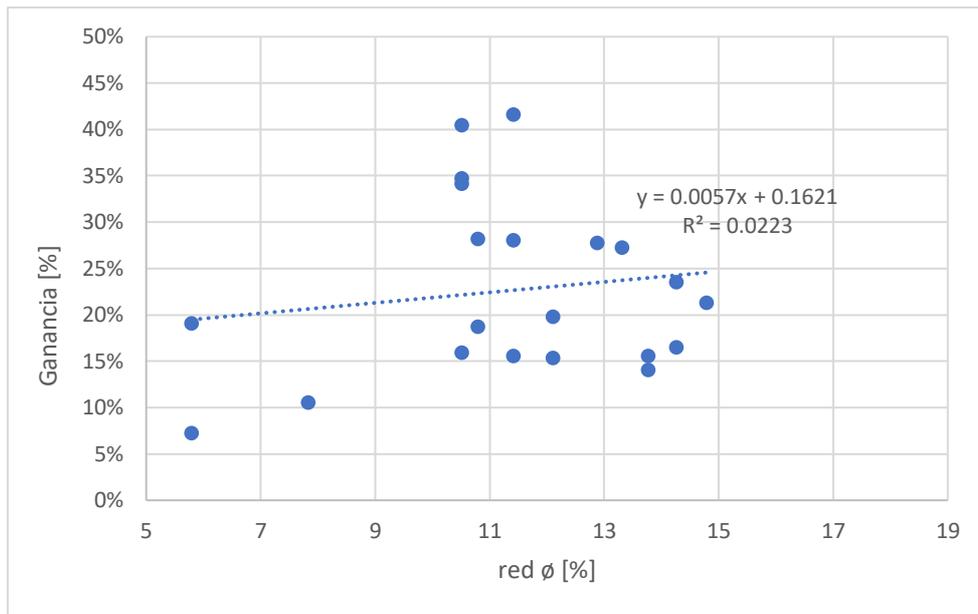


Figura 16. Porcentaje de ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro tipo Garret

4.2 Cementación.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos de tracción en muestras de cementación seleccionados para la realización del proyecto. Los resultados obtenidos se dividen por clasificación según diámetro en las **Tablas 9, 10 y 11**.

Tabla 9. Variables obtenidas y parámetros del ensayo de tracción en barras de diámetro medio

∅ alambrón [mm]	Rm Alambrón [MPa]	∅ Barra calibrada [mm]	Reducción de ∅ [%]	Rm Barra calibrada [MPa]	Ganancia Rm [MPa]	Ganancia Rm [%]
16	568	15	12,1	595	27	5%
15	576	14	12,9	612,1	36,1	6%
14	598	13	13,8	631,7	33,7	6%
13	603	12	14,8	646	43	7%
13	604	12	14,8	647	43	7%
12	609	11	16,0	674	65	11%
11	623	10	17,4	689	66	11%

Tabla 10 Variables obtenidas y parámetros del ensayo de tracción en barras de diámetro grueso

∅ alambrón [mm]	Rm Alambrón [MPa]	∅ Barra calibrada [mm]	Reducción de ∅ [%]	Rm Barra calibrada [MPa]	Ganancia Rm [MPa]	Ganancia Rm [%]
24	571	22	16,0	643	72	13%
24	553	22	16,0	649,1	96,1	17%
23	551	21	16,6	653,9	102,9	19%
21	546	20	9,3	618	72	13%
18	594	16,3	18,0	618	24	4%

Tabla 11. Variables obtenidas y parámetros del ensayo de tracción en barras de diámetro tipo Garret

∅ alambión [mm]	Rm Alambión [MPa]	∅ Barra calibrada [mm]	Reducción de ∅ [%]	Rm Barra calibrada [MPa]	Ganancia Rm [MPa]	Ganancia Rm [%]
37	536	35	10,5	557,1	21,1	4%
37	527	35	10,5	560,4	33,4	6%
37	551	35	10,5	619	68	12%
37	556	35	10,5	637	81	15%
37	536	35	10,5	660	124	23%
36	533	34	10,8	565,5	32,5	6%
34	552	32	11,4	592,8	40,8	7%
34	552	32	11,4	643,1	91,1	17%
32	586	30	12,1	620	34	6%
32	580	30	12,1	630	50	9%
32	583	30	12,1	658	75	13%
28	575	26	13,8	601	26	5%
27	580	25	14,3	595,3	15,3	3%
27	537	26	7,3	611	74	14%
27	580	25	14,3	676,2	96,2	17%

4.2.1 Influencia del diámetro en la resistencia mecánica obtenida

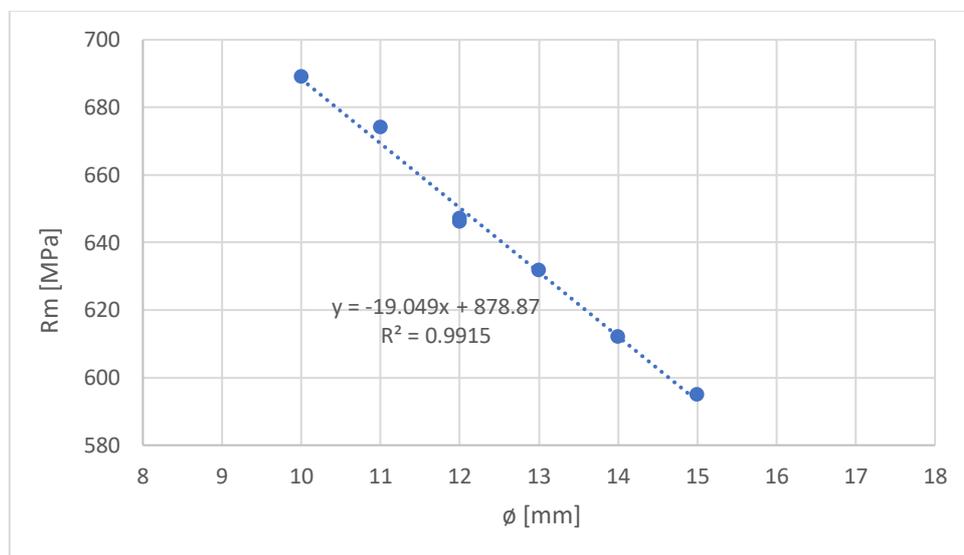


Figura 17. Resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro medio

La **Figura 17** muestra la representación de datos de resistencia mecánica en función del diámetro final para barras con diámetros medios. Se observa una fuerte linealidad entre las variables, que representa una disminución de la

magnitud de resistencia mecánica a medida que aumenta el diámetro de la barra analizada.

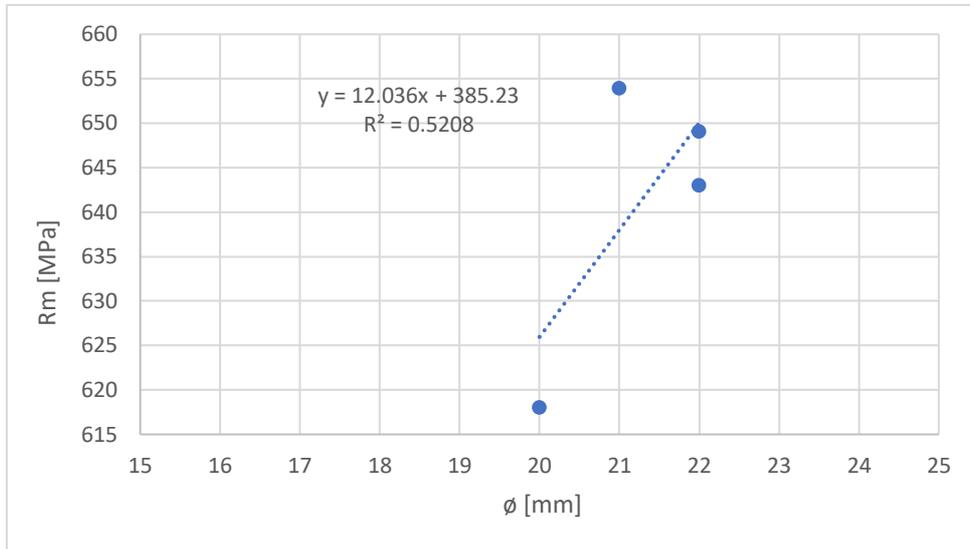


Figura 18. Resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro grueso.

La **Figura 18** representa la variación de resistencia mecánica en función del diámetro en barras con diámetro grueso. Se observa un aumento de la resistencia mecánica a medida que aumenta el diámetro de la barra. Cabe destacar que se trata de una representación con un número de muestras bajo.

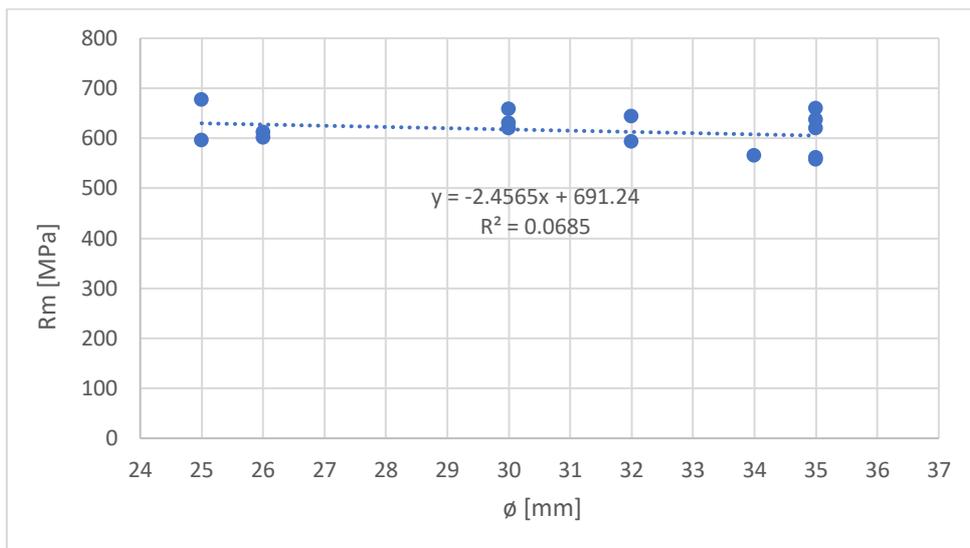


Figura 19. Resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro tipo Garret

Tal y como se puede observar en la **Figura 19**, para barras de diámetros *Garret* la tendencia de la resistencia mecánica en función del diámetro es opuesta a la observada en los diámetros gruesos y medios, recalcando que existe una linealidad muy baja entre los datos.

4.2.2 Influencia de la reducción de diámetro

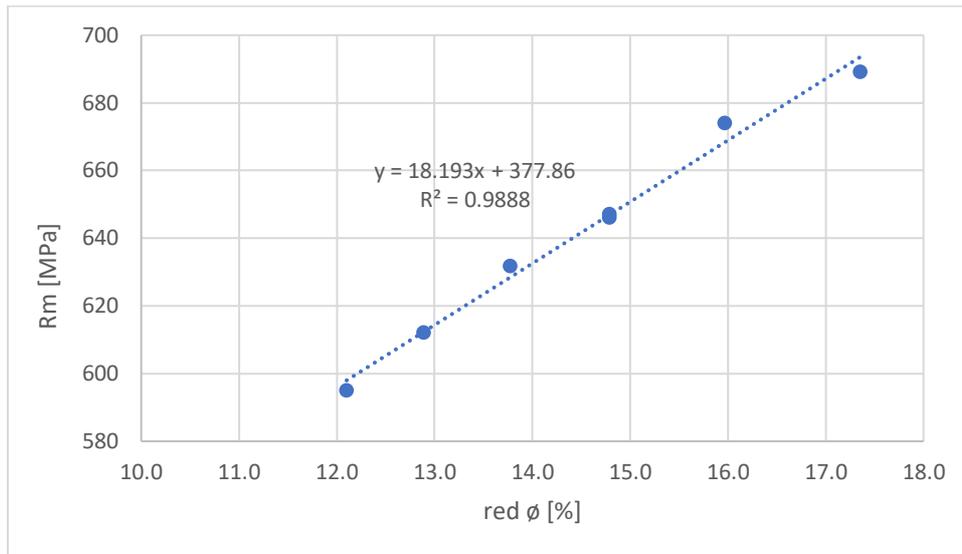


Figura 20. Resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro medio

La **Figura 20** representa los datos de resistencia mecánica obtenidos en función de la reducción de diámetro a la que se han sometido las barras. Destaca la alta linealidad de los datos obtenidos, que muestran una tendencia positiva de la resistencia mecánica a medida que aumenta la reducción de diámetro para barras con diámetro medio.

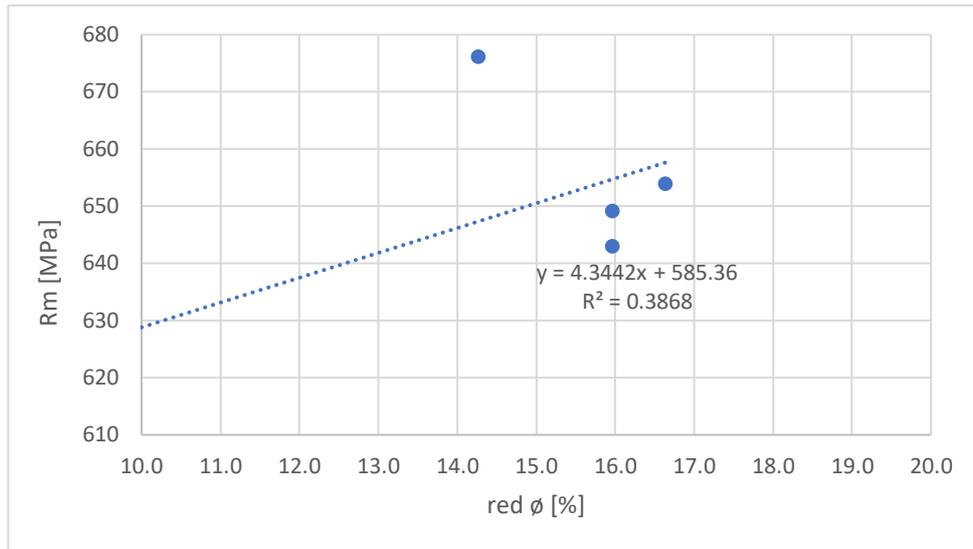


Figura 21. Resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro grueso.

La **Figura 21**, que representa la variación de resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro para barras de diámetros gruesos, muestra una tendencia análoga a aquella observada en diámetros medios, perdiendo en este caso linealidad entre los datos y graficando un número inferior de datos.

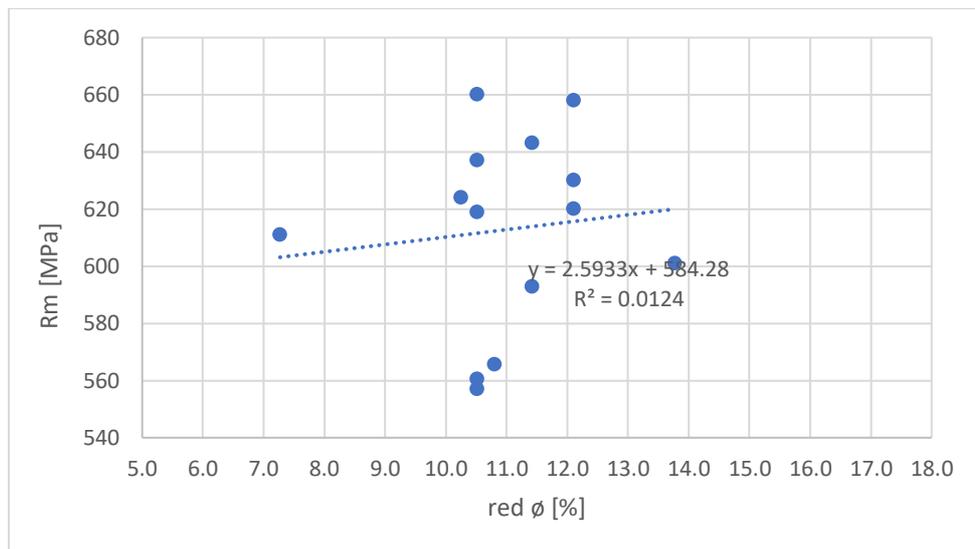


Figura 22. Resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro tipo Garret

Finalmente, se representan los datos obtenidos para los diámetros tipo Garret, mostrados en la **Figura 22**. La linealidad entre los datos es muy baja, con un coeficiente de correlación lineal próximo a cero, y la tendencia de los datos muestran un aumento de la resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro.

4.2.3 Análisis de la ganancia obtenida

4.2.3.1 Análisis de la ganancia obtenida en función del diámetro.

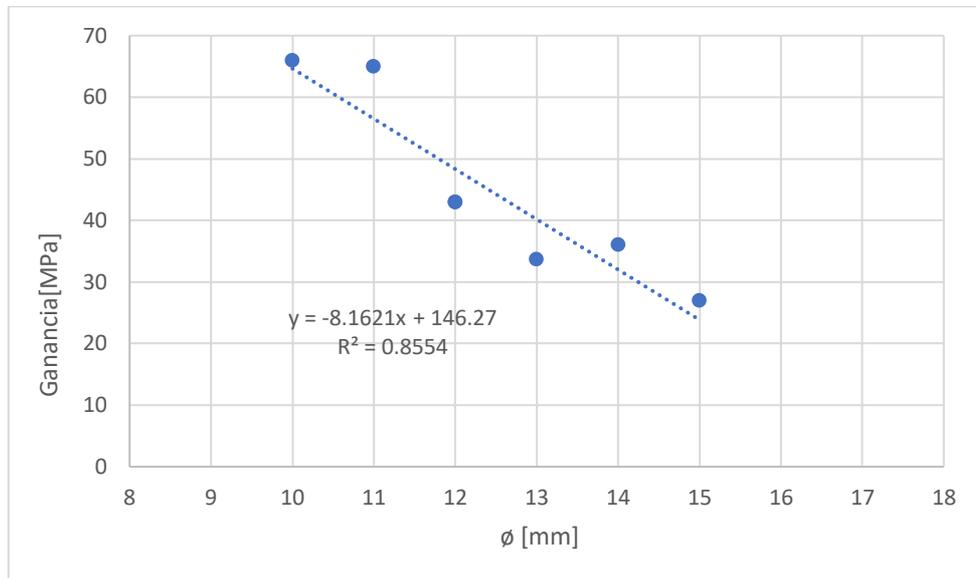


Figura 23. Ganancia en resistencia mecánica en función del diámetro en barras de diámetro medio

Los datos representados en la **Figura 23** muestran la variación en la ganancia de resistencia mecánica a medida que aumenta el diámetro de las barras catalogadas como barras de diámetro medio. Se observa un decrecimiento de la ganancia en función del aumento de diámetro de la barra con una linealidad alta, correspondiente a un coeficiente de correlación lineal próximo a 0,90.

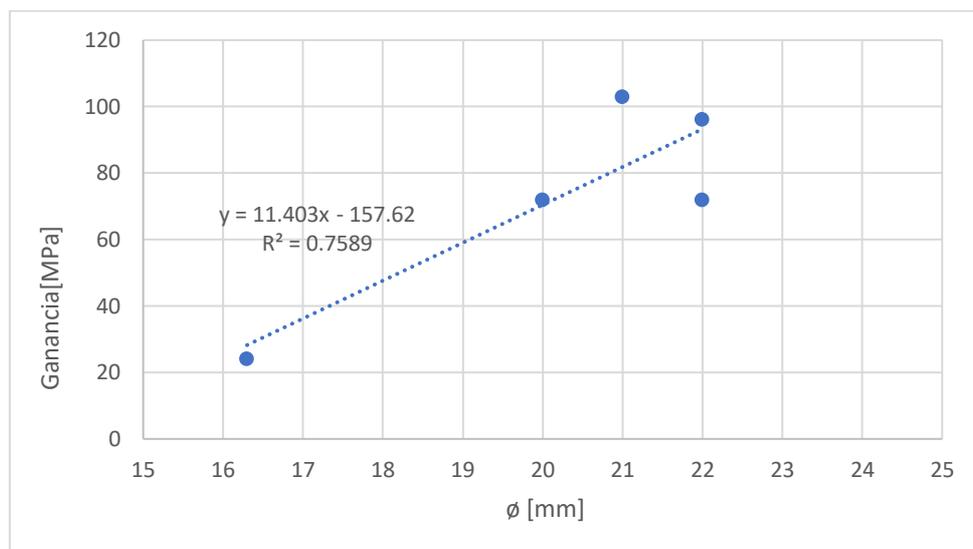


Figura 24. Ganancia en resistencia mecánica en función del diámetro en barras de diámetro grueso

Al contrario que la gráfica mostrada anteriormente, los datos representados en la **Figura 24** para diámetros gruesos, muestran un aumento de la ganancia en función de un crecimiento en el diámetro de la barra, presentando una linealidad entre datos aceptable.

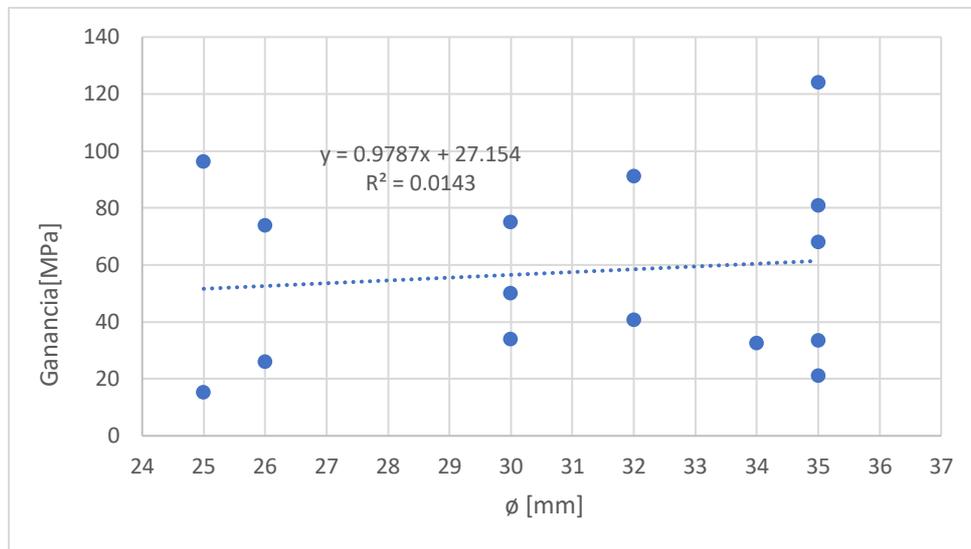


Figura 25. Ganancia en resistencia mecánica en función del diámetro en barras de diámetro tipo Garret

La **Figura 25** representa la variación de la ganancia en función del diámetro de barras tipo *Garret*. Los datos apenas muestran relación lineal, se puede observar un ligero crecimiento de la ganancia ligado a un aumento de diámetro de las muestras.

4.2.3.2 Análisis de la ganancia obtenida en función de la reducción de diámetro

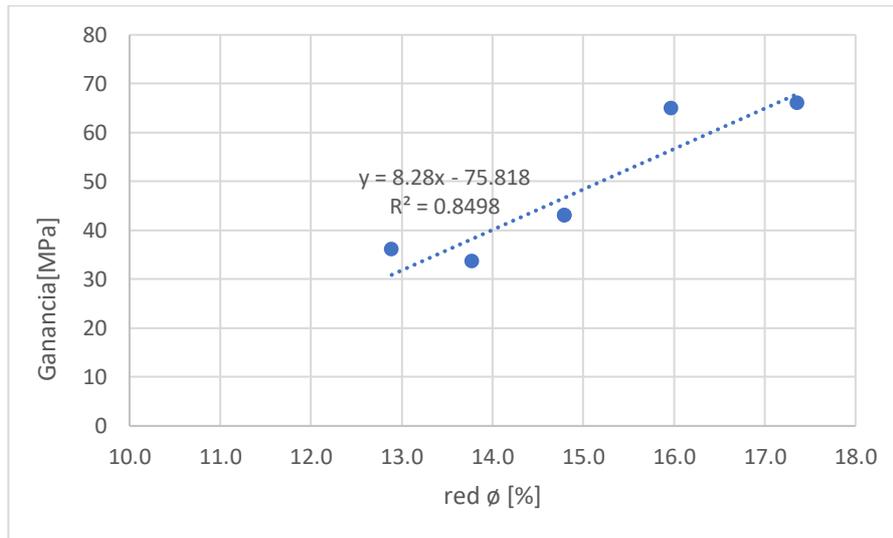


Figura 26. Ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro medio.

Al representar los datos de ganancia en resistencia mecánica frente a reducción de diámetro para barras con diámetro medio, mostrados en la **Figura 24**, se observa una fuerte dependencia lineal entre las variables. Los datos muestran un crecimiento de la ganancia en función del aumento de la reducción de diámetro.

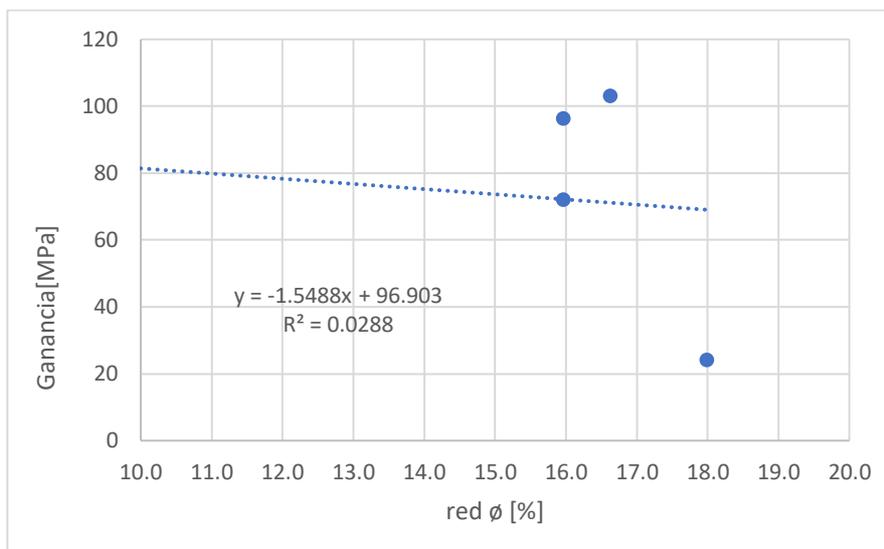


Figura 27. Ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro grueso.

Al contrario que en la **Figura 24**, los datos de ganancia en resistencia mecánica frente a reducción de diámetro en barras de diámetro grueso guardan una baja linealidad. Además, en este caso se observa un decrecimiento de la ganancia en función del aumento de la reducción de diámetro.

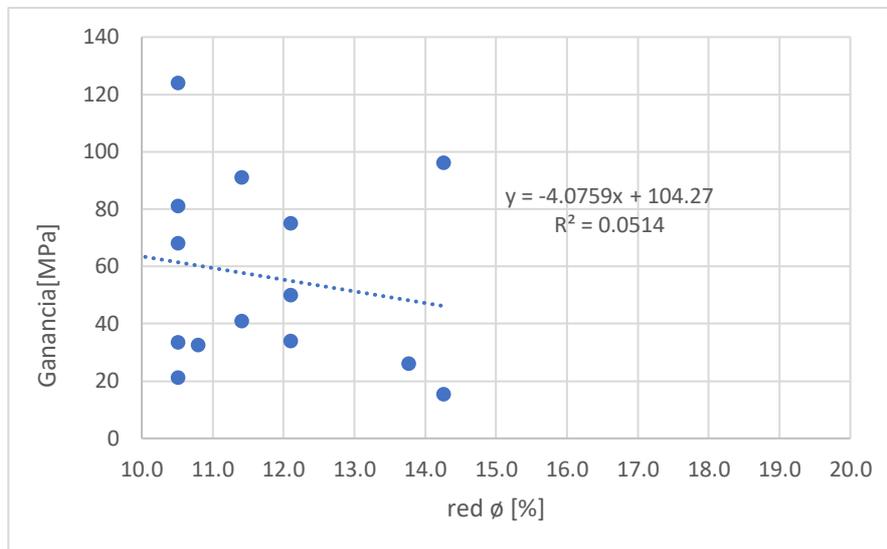


Figura 28. Ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro tipo Garret

Por último, los resultados obtenidos para barras de diámetro tipo Garret representados en la **Figura 26** tienen un comportamiento similar a los obtenidos para barras de diámetro grueso, caracterizados por un decrecimiento de la ganancia en función de la reducción de diámetro y por guardar una baja linealidad entre las variables.

A continuación, las **Figuras 27, 28 y 29** representan los porcentajes de ganancia frente al porcentaje de reducción de diámetro para las barras de diámetro medio, grueso y tipo *Garret*, respectivamente

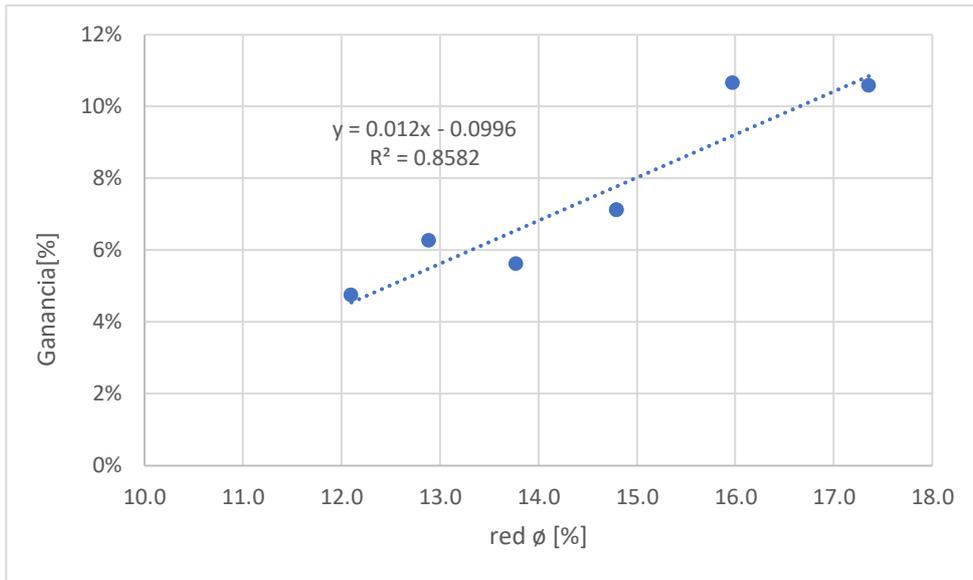


Figura 29. Porcentaje de ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro medio.

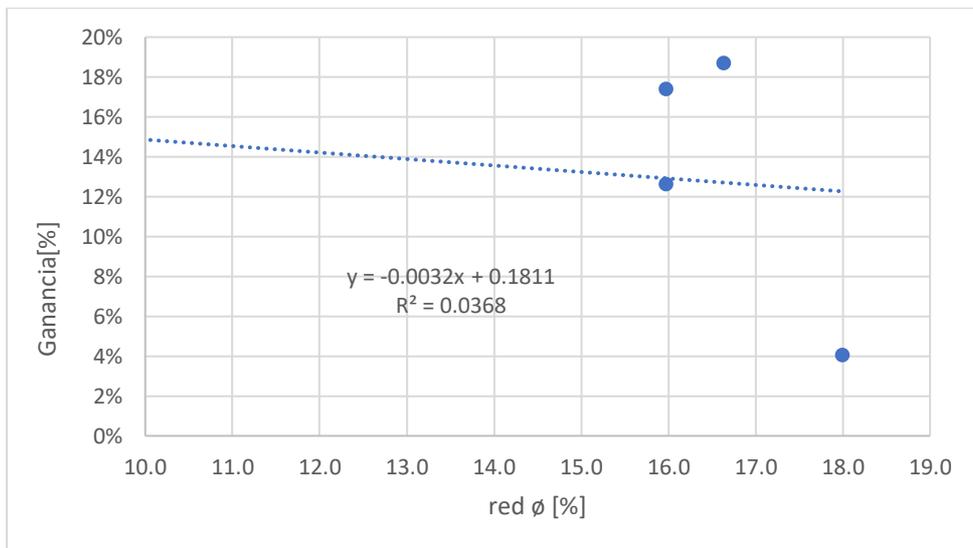


Figura 30. Porcentaje de ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro grueso.

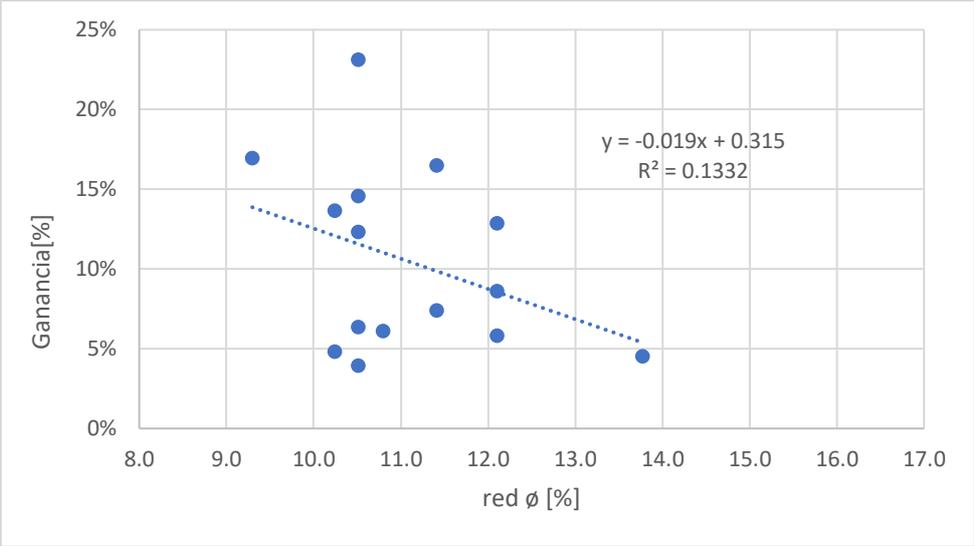


Figura 31. Porcentaje de ganancia en resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro en barras de diámetro tipo Garret

5 PRESUPUESTO Y PLAZO DE EJECUCIÓN

El proyecto llevado a cabo en Global Bright Bars conlleva una inversión en forma de gastos atendiendo a los conceptos siguientes:

- Coste de los ensayos de laboratorio: coste de los ensayos de tracción realizados y merma producida en la producción para obtención de muestras.
- Coste de mano de obra: horas de técnico de laboratorio para la recogida de muestras, y horas de ingeniería empleadas en los análisis realizados.

5.1 Coste de los ensayos de laboratorio y pérdidas

Se han empleado un total de 114 muestras ensayas a tracción, incluyendo ensayos no concluyentes y calidades no incluidas en el análisis realizado en el proyecto, teniendo en cuenta el coste 100€ por cada ensayo de tracción llevado a cabo en laboratorio.

Las muestras ensayadas equivalen a 91,20 kilogramos de pérdidas, las cuales podrían cotizarse para la empresa, como coste neto descontando la recuperación por chatarra (no de beneficio final perdido) a 3€/kg.

5.2 Coste de mano de obra

Se han empleado un total de 50 horas en la recogida preparación y almacenaje de muestras, teniendo en cuenta el coste de técnico de laboratorio de 50€/h.

Se han empleado un total de 500 horas de ingeniería en la recopilación y clasificación de los resultados experimentales, para su posterior análisis, obtención de conclusiones y redacción de informes pertinentes, a razón de 75€/h de ingeniería.

5.3 Resumen del presupuesto

En consideración de las partidas anteriores, el resumen del presupuesto queda como se indica en la **Tabla 12**. Debe tenerse en cuenta que se trata de un proyecto de I+D+i para la empresa, por lo que no se contemplan partidas de gastos generales ni de beneficio industrial, sino un coste exclusivo de honorarios incrementado con el I.V.A correspondiente.

Tabla 12. Presupuesto total del proyecto.

Concepto	Cantidad	Precio unitario (€)	Importe (€)
Ensayos de tracción	114	100,00	11.400,00
Kg pérdida producción	91,20	3,00	273,60
Horas técnico laboratorio	50	40,00	2.000,00
Horas ingeniería	500	60,00	30.000,00
IMPORTE TOTAL SIN I.V.A.			43.673,60 €
I.V.A. (21%)			9.171,46 €
TOTAL			52.845,06 €

5.4 Plazo de ejecución

El plazo de ejecución total del análisis llevado a cabo ha sido de 6 meses, distribuidos semanalmente en función de las siguientes tareas:

T.1: Estudio preliminar del proceso productivo y calidades fabricadas en GBB

T.2: Recopilación de históricos de muestras y preparación de las herramientas de toma de datos.

T.3: Planificación de la toma de muestras en función de la producción y del interés técnico

T.4: Recogida y preparación de muestras.

T.5: Depósito de muestras para análisis.

T.6: Recopilación y análisis de resultados.

T.7: Obtención de conclusiones.

La **Tabla 13** muestra la cronología del proyecto en función de las semanas empleadas en la realización de cada una de las distintas tareas.

Tabla 13. Cronograma de las actividades realizadas en el proyecto

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
T1	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow													
T2				Green	Green													
T3						Orange	Orange											
T4								Purple										
T5								Blue										
T6								Light Green										
T7															Red	Red	Red	Red

6 CONCLUSIONES Y PROS PECCIÓN DE FUTURO

6.1 Conclusiones

En este estudio se ha determinado la influencia de la reducción de diámetro en la resistencia mecánica de 52 muestras de *free cutting* y 26 muestras de cementación, con unos diámetros correspondientes a un rango entre 11 y 40 mm.

Globalmente, se destacan las siguientes conclusiones, que serán detalladas según la calidad del acero en los apartados 6.1.1 y 6.1.2;

- I. Se observa la misma tendencia decreciente en la resistencia mecánica en función del diámetro para barras de diámetro medio de calidades *free cutting* y cementación.
- II. Se observa un crecimiento de la resistencia mecánica y de su ganancia en función de un aumento en la reducción de diámetro presente en todos los rangos de diámetros analizados. Este crecimiento es de mayor magnitud en barras con diámetros bajos y desciende a medida que se aumenta el diámetro de la muestra.
- III. Se concluye al observar la linealidad que presentan todos los resultados mostrados en este proyecto, que las barr^oas con un diámetro medio, es decir, comprendido entre 11 y 16 mm, muestran tendencias fuertemente lineales, con coeficientes de correlación lineal elevados (en torno al 0,7 y 0,9). Esto podría explicarse debido a la alta fiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos de tracción de diámetros medios, puesto que no presentan las mismas dificultades que suelen presentar las barras de diámetro superior en la máquina de ensayo de tracción, como por ejemplo un desprendimiento de la muestra debido a un mal agarre de las mordazas de la máquina de ensayo, lo que deriva en coeficientes de correlación lineal generalmente bajos, destacando sobretodo aquellos derivados de la representación de muestras de diámetro tipo Garret.

6.1.1 Fácil mecanización o *free cutting*

Las muestras de fácil mecanización o *free cutting* representan un porcentaje mayoritario en el proyecto, lo que implica una mayor fiabilidad de los datos obtenidos debido a una alta repetibilidad en los ensayos y la obtención de conclusiones más robustas, debido a la observación de una alta linealidad en la representación de los resultados obtenidos.

Las conclusiones resultantes de representar los datos obtenidos en los ensayos de tracción son las siguientes.

- IV. Las barras clasificadas según su diámetro en barras de diámetro medio sufren un descenso en su resistencia mecánica a medida que aumenta su diámetro, al contrario que las barras de diámetro y diámetro tipo Garret, que sufren un aumento en su resistencia mecánica a medida que aumenta su diámetro
- V. Todas las muestras analizadas presentan una tendencia de crecimiento de resistencia mecánica en función de un aumento en la reducción de diámetro, siendo la magnitud de este crecimiento inferior a medida que aumenta el diámetro de la barra.
- VI. El comportamiento observado al representar los datos de ganancia en resistencia mecánica frente a diámetro sigue la misma tendencia que en el caso de la representación de resistencia mecánica frente a diámetro; se observa una tendencia decreciente en el caso de las barras de diámetro medio y creciente para las dos clasificaciones restantes en los valores de resistencia mecánica frente a diámetro.
- VII. De igual forma que en el caso de estudio de la resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro, todas las muestras analizadas presentan un crecimiento de la ganancia en función de la reducción de diámetro, siendo también inferior en barras de mayor diámetro frente

aquellas de diámetros más bajos, observado en la magnitud de las pendientes obtenidas en las rectas de cada gráfica.

- VIII. Se observa en todas las representaciones realizadas una pérdida de linealidad a medida que aumenta el diámetro de las barras. Los coeficientes de correlación lineal obtenidos para barras de diámetro medio oscilan entre valores de 0,57 y 0,62, para diámetros gruesos entre 0,27 y 0,43. Por último, las barras de diámetro tipo Garret presentan valores muy bajos que oscilan entre 0,01 y 0,15.

6.1.2 Cementación

Los datos disponibles de ensayos de tracción realizados a barras de acero de cementación son inferiores a los realizados en barras de calidad *free cutting*. A pesar de ello, los resultados muestran, en general, un coeficiente de correlación mayor en la representación gráfica de éstos, observándose tendencias más marcadas en esta calidad, que serán citadas a continuación en forma de conclusiones.

- I. Las barras clasificadas según su diámetro en barras de diámetro medio sufren un descenso de gran magnitud en su resistencia mecánica a medida que aumenta su diámetro, al contrario que las barras de diámetro grueso, que presentan un aumento del valor de resistencia mecánica de magnitud ligeramente inferior al decrecimiento de aquellas de diámetro medio. Por otro lado, las barras de diámetro tipo Garret sufren un leve decrecimiento en su resistencia mecánica a medida que aumenta su diámetro.
- II. Al igual que lo observado en los resultados de muestras de calidad *free cutting*, todas las muestras analizadas presentan una tendencia de crecimiento de resistencia mecánica en función de un aumento en la reducción de diámetro, también se observa un descenso de la pendiente de las rectas a medida que aumenta el diámetro de la barra.

- III. Los datos de ganancia en resistencia mecánica frente a diámetro muestran la misma tendencia que en el caso de la representación de resistencia mecánica frente a diámetro; al igual que en el caso de las muestras de acero *free cutting*. Destaca la alta linealidad que presentan los datos de las barras de diámetros gruesos, con un coeficiente de correlación lineal mucho mayor que el presentado en las muestras de *free cutting* para el mismo caso (0,75 frente a 0,37) y que el resto de los coeficientes obtenidos en las distintas representaciones de muestras de diámetro grueso.
- IV. Al analizar la resistencia mecánica en función de la reducción de diámetro, los resultados obtenidos muestran nuevamente (al igual que los obtenidos para muestras *free cutting*) un aumento de la ganancia en función de la reducción de diámetro para barras de diámetro medio. Sin embargo, los resultados obtenidos para barras de diámetro grueso y tipo Garret, presente un decrecimiento de la ganancia en función de la reducción de diámetro.

Cabe destacar la baja linealidad de los resultados graficados de muestras de diámetros gruesos, no habiendo observado este comportamiento en ninguno de los casos anteriormente estudiados para barras de diámetro grueso, tanto en esta calidad como en la de *free cutting*. El coeficiente de correlación lineal obtenido, cuyo valor es de 0,02, podría deberse a la poca cantidad de datos disponibles.

- V. La linealidad de los datos representados para las muestras de acero de cementación disminuye a medida que aumenta el diámetro de la muestra. Los coeficientes de correlación lineal obtenidos para barras de diámetro medio oscilan entre valores de 0,85 y 0,99 para diámetros gruesos entre 0,02 y 0,75 y para barras de diámetro tipo Garret se presentan valores bajos oscilando entre 0,01 y 0,06.

6.2 Prospección de futuro

El estudio realizado reveló importantes correlaciones entre las variables del proceso y las características mecánicas del acero, sin embargo, el volumen de muestras permanece insuficiente a la hora de tomar conclusiones sólidas que permitan una introducción de los resultados obtenidos en el proceso de diseño de producto. Para su implantación como variables de diseño se deberá continuar con el estudio, ya sea repitiendo ensayos ya realizados para validar resultados, como completando los rangos de diámetro y reducción de diámetro de las muestras seleccionadas. Además, debido a la alta variedad de productos que se ofertan en Global Bright Bars, el proyecto se centró únicamente en dos de las calidades producidas. Para realizar un estudio consolidado global de la relación de los parámetros de diseño con la calidad final de los productos los ensayos deberán continuarse incluyendo todas las calidades de acero producidas en la empresa, con el fin de obtener, finalmente, un sistema de diseño de producto validado y fiable que garantice un control total sobre las características finales del producto, permitiendo así un diseño preliminar, previo al proceso de producción, completamente controlado, que resulte práctico a la hora de ofertar los materiales y que facilite los procesos de control de calidad del producto.

Complementariamente, la realización de este tipo de estudios, permite a la empresa realizar análisis de viabilidad frente a pedidos de productos con características especiales, es decir, valores mecánicos que se desvíen de los estándares de los materiales, con el fin de diseñar materiales específicos y exclusivos, o por el contrario, rechazar aquellas ofertas que físicamente no puedan realizarse, sin que implique un coste en pruebas de producción, anticipándose a los resultados de características mecánicas que puedan obtenerse de forma teórica, evitándose así los costes pertinentes a su producción.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. Página web Acero.es. Historia y desarrollo del acero. [Consulta: 20-05-2023] Disponible en: <https://acero.es/historia-y-desarollo/>
2. Página web de la empresa Grupo Celsa [Consulta: 25-06-2023] Disponible en: <https://www.celsagroup.com>
3. Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID). Siderurgia, ¿Qué es el acero?. [Consulta: 19-06-2023] <https://unesid.org/que-es-el-acero/>
4. Página web de la empresa Grupo Celsa, Boletín, 2022 [Consulta: 26-06-2023] Disponible en: https://www.celsagroup.com/wp-content/uploads/2022/11/circular_cast_web_22baja.pdf
5. Página web de la empresa Global Steel Wire. Proceso de fabricación [Consulta: 26-06-2023] Disponible en: <https://globalsteelwire.com/proceso-de-fabricacion>
6. Página web METFUSION. Fabricación y procesamiento del acero. [Consultado 19-05-2023] Disponible en: <https://metfusion.wordpress.com/2013/10/14/fabricacion-y-procesamiento-del-acero/11-10-2013-19-51-40>
7. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Calidad y evaluación ambiental. Sistema Español de Inventario de Emisiones. Metodología de estimación de emisiones: Hornos Eléctrico de las Acerías. [Consulta 03-08-2023] Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040207-hornos-electr-acerias_tcm30-502317.pdf
8. López Rodríguez, J. 2011. Fundamentos de Conformación por Deformación Plástica. Capítulo 1: Introducción a la Deformación de Metales [material didáctico]. En: *Repositorio Digital Universidad Politécnica de Cartagena* [Consulta: 01-07-2023]. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/1933/pcd.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
9. Serrano R., web propia. [Consulta: 12-07-2023] Disponible en: http://www.raquelserrano.com/wp-content/files/cm_T_4_ENDURECIMIENTO_POR_DEFORMACION.pdf

10. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Calidad y evaluación ambiental. Sistema Español de Inventario de Emisiones. Metodología de estimación de emisiones: Laminación de acero. [Consulta 03-08-2023] Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/040208-lamina-acero_tcm30-456066.pdf
11. Asociación Española de Normalización. *UNE-EN 10277:2019. Productos calibrados de acero. Condiciones técnicas de suministro*. UNE [Consulta 10-05-2023] <https://www.une.org/>
12. International Organization for Standardization 2016. *ISO 683-1:2016: Aceros para tratamiento térmico, aceros aleados y aceros de fácil mecanización. Parte 1: Aceros no aleados para temple y revenido*. ISO [Consulta: 25-05-2023]. <https://www.iso.org>
13. International Organization for Standardization 2016. *ISO 683-3:2016: Aceros para tratamiento térmico, aceros aleados y aceros de fácil mecanización. Parte 3: Aceros para cementar*. ISO [Consulta: 25-05-2023]. <https://www.iso.org>
14. International Organization for Standardization 2016. *ISO 683-4:2016: Aceros para tratamiento térmico, aceros aleados y aceros de fácil mecanización. Parte 4: Aceros de fácil mecanización*. ISO [Consulta: 25-05-2023]. <https://www.iso.org>
15. Escritorio Educativo de la Junta de Andalucía, extracto gráfica [Consulta 10-06-2023] https://eдея.juntadeandalucia.es/bancorecursos/file/162c78fa-96ac-4456-a5a9-afab8ee21e47/1/es-an_2018091612_9181848.zip/descripcin_de_la_tarea.html?temp.hn=true&temp.hb=true

16. García Romero, A.M.; Monasterio Guisasola, N. 2018. Introducción a la ciencia de los materiales y sus propiedades I [material didáctico]. En: *OpenCourseWare Universidad del País Vasco* [Consulta:10-07-2023]. https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/51171/mod_resource/content/0/Tema%206-Comportamiento%20mecánico%20de%20los%20materiales.pdf