



**Centro Universitario de la Defensa  
en la Escuela Naval Militar**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Recuperación y tratamiento superficial (TTS)  
de piezas usadas en las prácticas de  
determinación del módulo elástico del CUD*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Jorge Hernández de Armijo González-Cela

**DIRECTOR:** Santiago Urréjola Madriñán

**CURSO ACADÉMICO:** 2016-2017

**Universida<sub>de</sub>Vigo**





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Recuperación y tratamiento superficial (TTS)  
de piezas usadas en las prácticas de  
determinación del módulo elástico del CUD*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universid<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

En el Centro Universitario de la Defensa se realizan una serie de prácticas sobre el cálculo del módulo de elasticidad en las que se utilizan unos juegos de varillas de acero. Debido a la oxidación existente en las mismas, es necesario que estas varillas sean sustituidas por unas nuevas.

Este trabajo nace como una solución alternativa a la compra de nuevos juegos de varillas. El inconveniente principal que implica adquirir unas piezas nuevas es su alto coste económico. Por ello, se plantea recuperar las piezas oxidadas de una manera más económica. Las piezas son limpiadas por medio de una limpieza electrolítica y posteriormente son tratadas superficialmente y recubiertas con un pintado por cataforesis para asegurar su perdurabilidad. Se plantea también la opción de un pintado manual con una pintura antioxidante en lugar de realizar la cataforesis.

Al finalizar el proceso de recuperación, se realizan las prácticas citadas con las nuevas varillas y se comparan los resultados con las varillas originales.

Finalmente se comparan las tres posibles soluciones: adquisición de juegos nuevos, pintado manual o tratamiento superficial y pintado por cataforesis.

## **PALABRAS CLAVE**

Oxidación, recuperación, electrolisis, cataforesis, módulo de elasticidad.



## **AGRADECIMIENTOS**

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres.

Quiero agradecer todo el apoyo mostrado durante el desarrollo de este proyecto a mi tutor Don Santiago Urréjola Madriñan.

También quiero agradecer al Dr. Don Miguel Núñez Díaz su inestimable ayuda en todo lo relativo a la parte de cataforesis. Sin él no habría sido posible desarrollar el trabajo.

Al profesor Andrés Suárez García por su colaboración y ayuda cada vez que me ha hecho falta.

A la profesora Dña. Sandra Castro Cao y al CC Don Felipe Carrascosa López por su labor como tutores durante estos años.

A mis compañeros de promoción.





## CONTENIDO

Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos .....	7
1.1 Justificación .....	7
1.2 Objetivos .....	8
1.3 Estructura del trabajo .....	8
2 Estado del arte .....	9
2.1 La corrosión .....	9
2.1.1 Introducción.....	9
2.1.2 Corrosión en piezas metálicas .....	9
2.1.3 Productos de la corrosión.....	9
2.1.4 Importancia de la corrosión .....	10
2.2 La limpieza electrolítica.....	10
2.2.1 Ventajas de la limpieza electrolítica .....	11
2.3 Tratamiento de superficies (TTS) .....	12
2.4 Cataforesis.....	14
2.4.1 Ventajas de la cataforesis.....	15
2.5 El módulo elástico.....	16
3 Desarrollo del TFG.....	17
3.1 Metodología .....	17
3.1.1 Introducción.....	17
3.1.2 Fases del proyecto.....	18
3.1.3 Limpieza de las varillas .....	19
3.1.4 Tratamiento Superficial, Cataforesis y Pintado .....	21
3.1.5 Determinación del Módulo Elástico .....	24
4 Resultados .....	27
4.1 Fases del proyecto.....	27
4.2 Limpieza.....	28
4.3 Tratamiento de superficies, cataforesis y pintado .....	30
4.4 Cálculo del Módulo Elástico.....	34
4.5 Comparativa de las soluciones estudiadas .....	38
4.5.1 Adquisición de un nuevo juego de varillas.....	39
4.5.2 Limpieza, tratamiento y pintado por cataforesis a diferentes voltajes.....	39

4.5.3 Limpieza tratamiento y pintado con pintura antioxidante .....	40
4.5.4 Resumen ventajas y desventajas .....	41
5 Conclusiones y líneas futuras .....	43
5.1 Conclusiones .....	43
5.2 Líneas Futuras .....	43
6 Bibliografía.....	45
7 Anexos.....	47
I. ANEXO I: Precio Juego Varillas SIDILAB.....	48
II. ANEXO II: Fotografías piezas inicialmente .....	49
III. ANEXO III: Fotografías piezas tras limpieza .....	52
IV. ANEXO IV: Fotografías piezas tras pintado .....	55
V. ANEXO V: Ensayos Módulo de elasticidad .....	58
VI. ANEXO VI: Ficha Técnica Oxsilan [17] .....	67
VII. ANEXO VII: Ficha Técnica fuente de alimentación [18] .....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esquema básico de una celda electrolítica. ....	11
Figura 2-2 Etapas del TTS Clásico.....	13
Figura 2-3 Etapas del TTS Verde.....	13
Figura 2-4 Esquema básico de una cataforesis.....	14
Figura 2-5 Diagrama Tensión-Deformación .....	16
Figura 3-1 Varilla 20mm x 1,5mm x 500mm .....	17
Figura 3-2 Esquema General Desarrollo del Trabajo.....	18
Figura 3-3 Microscopio A. KRUSS OPTRONIC .....	19
Figura 3-4 Pieza 11 Antes y después de Lijado .....	19
Figura 3-5 Recipiente de plástico .....	20
Figura 3-6 Colocación del alambre .....	21
Figura 3-7 Montaje de Celda Electrolítica .....	21
Figura 3-8 Momento de mezclado del baño.....	23
Figura 3-9 Fuentes de alimentación .....	23
Figura 3-10 Toma de vista microscópica tras cataforesis .....	24
Figura 3-11 Pintura Antioxidante HAMMERITE.....	24
Figura 3-12 Montaje "Determinación del Módulo Elástico" .....	25
Figura 3-13 Ensayo de flexión pieza 11 .....	25
Figura 4-1 Vista general Pieza 8 .....	28
Figura 4-2 Vista al Microscopio Pieza 8 .....	28
Figura 4-3 Vista general Pieza 3 .....	29
Figura 4-4 Vista al Microscopio Pieza 3 .....	30
Figura 4-5 Vista general Pieza 4 .....	30
Figura 4-6 Vista al Microscopio Pieza 4 .....	31
Figura 4-7 Vista general Pieza 10 .....	32
Figura 4-8 Vista al Microscopio Pieza 10 .....	33
Figura 4-9 Ejemplo de ensayo de flexión Pieza 1 .....	34
Figura 4-10 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 1 .....	36
Figura 4-11 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 2.....	36
Figura 4-12 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 3.....	36
Figura 4-13 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 4.....	37
Figura 4-14 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 5.....	37
Figura II-1 Pieza 1 Inicialmente .....	49

Figura II-2 Pieza 2 Inicialmente .....	49
Figura II-3 Pieza 3 Inicialmente .....	49
Figura II-4 Pieza 4 Inicialmente .....	49
Figura II-5 Pieza 5 Inicialmente .....	50
Figura II-6 Pieza 6 Inicialmente .....	50
Figura II-7 Pieza 7 Inicialmente .....	50
Figura II-8 Pieza 8 Inicialmente .....	50
Figura II-9 Pieza 9 Inicialmente .....	51
Figura II-10 Pieza 10 Inicialmente .....	51
Figura II-11 Pieza 11 Inicialmente .....	51
Figura III-1 Pieza 1 Tras Limpieza .....	52
Figura III-2 Pieza 2 Tras Limpieza .....	52
Figura III-3 Pieza 3 Tras Limpieza .....	52
Figura III-4 Pieza 4 Tras Limpieza .....	52
Figura III-5 Pieza 5 Tras Limpieza .....	53
Figura III-6 Pieza 6 Tras Limpieza .....	53
Figura III-7 Pieza 7 Tras Limpieza .....	53
Figura III-8 Pieza 8 Tras Limpieza .....	53
Figura III-9 Pieza 9 Tras Limpieza .....	54
Figura III-10 Pieza 10 Tras Limpieza .....	54
Figura III-11 Pieza 11 Tras Lijado .....	54
Figura IV-1 Pieza 1 Tras Cataforesis .....	55
Figura IV-2 Pieza 2 Tras Cataforesis .....	55
Figura IV-3 Pieza 3 Tras Cataforesis .....	55
Figura IV-4 Pieza 4 Tras Cataforesis .....	55
Figura IV-5 Pieza 5 Tras Cataforesis .....	56
Figura IV-6 Pieza 6 Tras Cataforesis .....	56
Figura IV-7 Pieza 7 Tras Cataforesis .....	56
Figura IV-8 Pieza 8 Tras Cataforesis .....	56
Figura IV-9 Pieza 9 Tras Cataforesis .....	57
Figura IV-10 Pieza 10 Tras Pintado Manual .....	57
Figura IV-11 Pieza 11 Tras Pintado Manual .....	57
Figura V-1 Ensayo Módulo Elástico Pieza 1 .....	58
Figura V-2 Ensayo Módulo Elástico Pieza 2 .....	59
Figura V-3 Ensayo Módulo Elástico Pieza 3 .....	59
Figura V-4 Ensayo Módulo Elástico Pieza 4 .....	60

Figura V-5 Ensayo Módulo Elástico Pieza 5 .....	61
Figura V-6 Ensayo Módulo Elástico Pieza 6 .....	61
Figura V-7 Ensayo Módulo Elástico Pieza 7 .....	62
Figura V-8 Ensayo Módulo Elástico Pieza 8 .....	63
Figura V-9 Ensayo Módulo Elástico Pieza 9 .....	64
Figura V-10 Ensayo Módulo Elástico Pieza 10 .....	65
Figura V-11 Ensayo Módulo Elástico Pieza 11 .....	66

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparativa Anaforesis – Cataforesis [13] .....	15
Tabla 2 Pesos y Espesores Antes de Limpieza.....	27
Tabla 3 Pesos y Espesores tras Limpieza Electrolítica .....	29
Tabla 4 Pesos y Espesores tras Cataforesis .....	31
Tabla 5 Medias variación peso y espesor .....	32
Tabla 6 Pesos y Espesores tras pintado .....	33
Tabla 7 Comparativa Cataforesis - Pintado Manual .....	33
Tabla 8 Comparativa Módulo Elástico Obtenido-Fabricante.....	35
Tabla 9 Desviación porcentual según el voltaje .....	38
Tabla 10 Ponderaciones de los factores evaluados.....	41
Tabla 11 Comparativa posibles soluciones .....	42
Tabla 12 Ensayo Módulo Elástico Pieza 1 .....	58
Tabla 13 Ensayo Módulo Elástico Pieza 2 .....	59
Tabla 14 Ensayo Módulo Elástico Pieza 3 .....	60
Tabla 15 Ensayo Módulo Elástico Pieza 4 .....	60
Tabla 16 Ensayo Módulo Elástico Pieza 5 .....	61
Tabla 17 Ensayo Módulo Elástico Pieza 6 .....	62
Tabla 18 Ensayo Módulo Elástico Pieza 7 .....	62
Tabla 19 Ensayo Módulo Elástico Pieza 8 .....	63
Tabla 20 Ensayo Módulo Elástico Pieza 9 .....	64
Tabla 21 Ensayo Módulo Elástico Pieza 10 .....	65
Tabla 22 Ensayo Módulo Elástico Pieza 11 .....	66

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Justificación

La oxidación es un problema habitual en las piezas metálicas que se encuentran expuestas a las condiciones ambientales y que deteriora y corroe el material. Es necesario, por lo tanto, solucionar este hecho para aumentar el tiempo de vida de las piezas metálicas.

Este trabajo comienza como una posible solución al problema de oxidación que se lleva observando durante varios años en unas piezas de acero. En concreto, nos referimos a las piezas de acero utilizadas por los alumnos del Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval Militar en las prácticas de *Determinación del módulo elástico* de la asignatura de Resistencia de materiales. Se ha observado que el óxido acumulado en estas piezas impide su reutilización en años posteriores. Esto implica que la renovación de estas piezas se remita a adquirir piezas nuevas, lo cual supone un gasto económico que se podría evitar. El precio de cada módulo de varillas planas, proporcionado por la empresa Sidilab (Sistemas Didácticos de Laboratorio) asciende a 329,04 € (IVA INCLUIDO) (ver ANEXO I: Precio Juego Varillas SIDILAB).

Durante los últimos cinco años se han utilizado en total diez juegos de estas varillas. Esto supone un coste total aproximado de 3300 €.

Es aquí donde nace este trabajo. Se pretende buscar una solución a este problema limpiando esas piezas de acero y luego protegiéndolas para ralentizar su futura oxidación. Además se comprobará que el resultado obtenido cumple la función que ya cumplía anteriormente. Es decir, que la capa protectora siga resistiendo a los ensayos de elasticidad.

Para el desarrollo de este trabajo, nos basamos en tres trabajos anteriores: los Trabajos de Fin de Grado "*Recuperación electrolítica de piezas de acero oxidadas*", realizado por Enrique Díaz Zuaza [1], y "*Optimización de la limpieza electrolítica de sustratos metálicos oxidados*" de Javier Lora García [2] y en la Tesis Doctoral "*Reducción de partículas ocluidas en carrocería cataforizada en una instalación de pintura de automóviles*" realizada por el Doctor Don Miguel Núñez Díaz del laboratorio de pinturas del centro de producción de la empresa Citroën Hispania en Vigo [3].

En el primero de ellos, se realizaron diversos métodos de limpieza de piezas oxidadas y se comprobó que la electrólisis era un método económico y viable para la limpieza de piezas de acero. Aun así, los tiempos de ejecución a los que se llegaron en las conclusiones, implicaban unas realizaciones que superaban las tres horas de media. Ésto era un dato que impedía plantearse realizar un trabajo como el actual.

Sin embargo, en el segundo de ellos, se realizaron diversas pruebas para optimizar éste mismo método. Se consiguieron reducir los tiempos de ejecución de más de tres horas de media a tan sólo diez minutos. Ésto fue fundamental para plantear este proyecto, pues un gasto de tiempo muy alto implicaría que no fuera tan rentable la recuperación de las piezas. Conociendo estos datos, la electrólisis será el método que se utilice para la limpieza de las piezas de acero oxidadas.

Una vez que hayamos realizado esta limpieza, la siguiente parte del trabajo consistirá en proteger dichas piezas de futuras oxidaciones. Primeramente se tratan las varillas y posteriormente se someten al pintado por cataforesis, que será el método de protección superficial que utilizaremos. Es el método utilizado en la industria de la automoción para el pintado de las carrocerías y, para nuestro trabajo, se adaptará ese proceso industrial a un proceso que pueda realizarse con los recursos del laboratorio. Con la cataforesis, una película de pintura quedará adherida a las piezas y las protegerá de la corrosión. Éste es el proceso que asegurará el mantenimiento de las barras metálicas y la principal solución al problema planteado. Si únicamente fueran sometidas a la limpieza electrolítica, el ambiente y el paso del tiempo se encargarían de devolver a las piezas metálicas a su estado natural y habría que volver a limpiarlas.

Por último, como ya se ha dicho, se comprobará que tras pasar por el proceso de cataforesis las varillas sigan pudiendo ser utilizadas en las prácticas de la asignatura de Resistencia de materiales.

## 1.2 Objetivos

Teniendo en cuenta todo lo mencionado, para el desarrollo de este trabajo se fija un objetivo principal:

- Lograr un método válido, económico y sencillo de recuperación de las piezas de acero sin tener que recurrir a la compra de nuevas piezas.

Y se fijan además dos objetivos secundarios:

- Establecer los parámetros de cataforesis más eficientes para un mejor resultado final.
- Comparar distintas soluciones, cataforesis, pintado manual y compra de nuevo material en función de diferentes parámetros como el precio, el tiempo empleado o la sencillez.

## 1.3 Estructura del trabajo

Para ayudar al seguimiento de la memoria, se describe de manera resumida la estructura que sigue la memoria en cada uno de los capítulos:

- En el Capítulo 2 se define primeramente el problema, en este caso la corrosión. Posteriormente se hace referencia a los procesos por los que van a pasar las varillas de acero. Se habla de la electrolisis y la limpieza electrolítica, tras lo cual se definen los tratamientos superficiales y la cataforesis. Por último, se realiza una breve reseña sobre el módulo elástico.
- En el Capítulo 3 se explica todo el proceso experimental por el que ha pasado este trabajo.
- En el Capítulo 4 se comenta la parte experimental y se hace un análisis de los resultados.
- Por último, en el Capítulo 5 se establecen una serie de conclusiones finales.



## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 La corrosión

#### 2.1.1 Introducción

Cómo se ha mencionado, el problema al cual nos enfrentamos y que afecta a las piezas que vamos a tratar en este trabajo es la oxidación. La oxidación no es más que un tipo de corrosión que sufren en este caso las piezas metálicas. Podemos definir la corrosión como el “*Resultado destructivo de la reacción química entre un metal o aleación y su ambiente*” o “*Desgaste superficial que sucede cuando los metales se exponen a ambientes reactivos*” [4]. En este caso, así lo expresan en la web del Repositorio Institucional de la Universidad de Alicante, aunque podemos encontrar innumerables explicaciones del término.

#### 2.1.2 Corrosión en piezas metálicas

En la corrosión de los metales influyen tanto las propiedades del metal como las propiedades ambientales. En función de cómo son atacados podemos hacer la siguiente clasificación [5]:

- **Corrosión electroquímica:** para que este tipo de corrosión ocurra es necesario un ambiente húmedo. Es necesaria también que haya establecida una celda electrolítica, con zona anódica, catódica y electrolito conductor. A este tipo de corrosión también se le denomina corrosión húmeda o acuosa debido a que el electrolito conductor suele ser el agua. Este tipo de corrosión no afecta a toda la superficie, sino únicamente a las zonas anódicas.
- **Corrosión química:** también conocida como corrosión seca, directa o a altas temperaturas. Se produce cuando el metal reacciona con el medio. En este caso, la corrosión afectaría a toda la superficie metálica. Le diferencia de la electroquímica la no necesidad de un electrolito conductor. A altas temperaturas se pueden producir degradaciones considerables del metal.

#### 2.1.3 Productos de la corrosión

Las piezas metálicas sobre las que vamos a trabajar son de acero. El acero es una aleación de hierro con pequeñas cantidades de carbono. Se caracteriza por tener unas buenas propiedades físicas y una elevada resistencia mecánica. Además, admite diversos tratamientos térmicos que mejoran sus cualidades. Debido a estas características, el acero es un material muy utilizado en multitud de procesos industriales.

Al ser el acero una aleación del hierro, es necesario indicar que el hierro es un elemento que se corroe con facilidad, formando óxidos e hidróxidos en su superficie que causan deformaciones en las

piezas. Como se indica en el trabajo *Recuperación electrolítica de piezas de acero oxidadas* [1], en el proceso de corrosión del hierro los productos más comunes son:

- Cloruros férrico y ferroso.
- Oxihidróxidos férricos.
- Óxido Verde.
- Oxiclорuro férrico.
- Cloruro Sódico.
- Carbonato Cálcico.

#### 2.1.4 Importancia de la corrosión

Es importante recalcar el efecto económico que puede llegar a suponer la corrosión de los materiales. Una parte importante de los gastos de una empresa va destinada a reemplazar maquinaria corroída, pero también hay que tener en cuenta los costes que suponen la prevención y protección de los materiales frente a la corrosión. Esto serían los denominados costes directos.

Además de los costes directos, hay que tener en cuenta los costes indirectos del sector, entre los que destacan entre otros [4]:

- Tiempo de parada en planta: dependiendo de la empresa, un solo día de parada por reparaciones/reemplazamientos puede suponer pérdidas millonarias.
- Pérdida de producto: fugas en tuberías, contenedores...
- Pérdidas de eficiencia: por ejemplo al corroerse pistón y cilindro en el motor de un automóvil.
- Contaminación: de productos químicos, como jabones, o de otros productos como el agua, debido a la corrosión de las tuberías.
- Costes por sobrediseño: elementos sobredimensionados para evitar la corrosión cuando con una adecuada protección se podrían reducir medidas y ahorrar materiales.

En definitiva, la corrosión es un fenómeno de vital importancia frente al cuál hay que tomar las medidas que sean necesarias para combatirlo. Hay numerosos estudios acerca del impacto económico de la corrosión. Algunos ejemplos los encontramos en la página web de la ASM (American Society for Metals) donde se encuentran referencias al estudio *Economic Effects of Metallic Corrosion in the United States*, que estimó que la corrosión en los Estados Unidos en el año 1975 suponía un coste de 82 mil millones de dólares anuales. Sobre el PIB de ese año estas pérdidas suponían a un 4,9%. El estudio fue realizado por los Laboratorios Battelle Columbus y el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología. Al menos un 40% del total era evitable. También se hace referencia a que en el año 1995 se estimó un coste de 296 mil millones de dólares anuales debido a la corrosión. Sin embargo, el porcentaje sobre el PIB descendió hasta un 4,2% [6], [7].

Como podemos apreciar, las pérdidas por corrosión son realmente importantes en la industria y por lo tanto, suponen un problema de vital importancia.

## 2.2 La limpieza electrolítica

El proceso electrolítico o electrolisis es aquel que separa los elementos de un compuesto por medio de la corriente eléctrica. La corriente eléctrica circula entre dos electrodos que se encuentran sumergidos en una disolución. El electrodo positivo es conocido como ánodo y el negativo como cátodo. Cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta. Es decir, los iones negativos se separan del cátodo y son atraídos por el ánodo y los iones positivos hacen lo contrario, se desplazan desde el cátodo hacia el ánodo [8].

En la siguiente imagen podemos ver un esquema de una celda electrolítica:

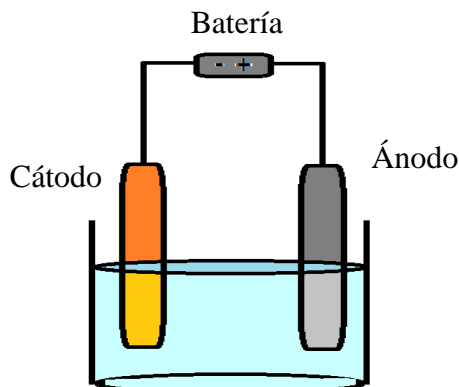


Figura 2-1 Esquema básico de una celda electrolítica.

La electrolisis es el método que utilizaremos para la limpieza de las piezas de acero corroídas, pero, además de la limpieza, esta técnica tiene también otro tipo de aplicaciones, entre las destacan:

- Producción y refinado de diversos metales como Al, Na, Li, etc.
- Producción de compuestos como NaOH, HCl.
- Producción de hidrógeno a través de la electrolisis del agua.
- Separar el metal de otros compuestos (Electrometalurgia).
- Producción de hipoclorito para la cloración de piscinas.
- Anodización y galvanoplastia para prevenir la corrosión en superficies metálicas [1].

La limpieza electrolítica se puede utilizar para la eliminación de óxidos adheridos a las superficies metálicas. Es un proceso utilizado con frecuencia en la industria siderúrgica para la limpieza de superficies metálicas. El proceso se divide en dos etapas: en la primera de ellas, el metal se somete a unos pretratamientos con la finalidad de eliminar las partículas que están menos adheridas y las grasas y aceites que estuvieran presentes en la superficie. Esta primera etapa se denomina la etapa de limpieza. En la segunda, se realiza la electrolisis. El metal, conectado a una fuente de alimentación externa, se sumerge en la disolución conductora junto con el otro electrodo. Esta etapa se puede realizar en corriente anódica o corriente catódica:

- Corriente anódica: el metal recibe una carga positiva y se produce oxígeno en su superficie.
- Corriente catódica: el metal recibe carga negativa y lo que se produce en la superficie del metal es hidrógeno. El burbujeo de gases es el causante del desprendimiento de los contaminantes adheridos a la superficie [9].

### 2.2.1 Ventajas de la limpieza electrolítica

La electrolisis es uno de los múltiples procesos que existen a la hora de realizar limpieza de metales. No existe un método que sea considerado el mejor de todos ellos, ya que todos tienen ventajas e inconvenientes. Además del método electroquímico, otros métodos que se utilizan en la actualidad son:

- Métodos químicos convencionales: como por ejemplo baños en agua destilada, baños en disoluciones de sulfito sódico, baños en disoluciones de sesquicarbonato sódico, baños en disoluciones de hidróxido de litio, baños en amoníaco o baños en atmósferas de hidrógeno a altas temperaturas.
- Métodos físicos o mecánicos: como por ejemplo lijado, cepillado o chorro de arena o granallado.
- Limpieza de metales por ultrasonidos: continuo desarrollo de nuevos equipos, suele dar buenos acabados superficiales incluso en piezas de formas irregulares o con huecos.

- Limpieza de metales con láser: técnica innovadora todavía en fase de experimentación. Es un método capaz de eliminar productos de la corrosión de forma selectiva sin necesidad de una intervención manual sobre la pieza.

Una visión global y bastante resumida de los métodos de limpieza que se utilizan hoy en día sería el siguiente: los métodos físicos o mecánicos son los más extendidos debido a que no demandan unos conocimientos ni unos presupuestos altos. Sin embargo, están considerados como los que peor resultados ofrecen, debido a que suelen dejar marcadas con relativa frecuencia las piezas a recuperar. Los métodos químicos ofrecen mejores resultados pero demandan unos conocimientos y unos recursos mayores que los métodos físicos. Por otro lado, existen diferentes métodos alternativos y modernos como la limpieza por ultrasonidos y la limpieza por medio del láser. Estos métodos están en desarrollo y precisan de altos presupuestos para llevarse a cabo. Finalmente, los métodos electroquímicos, como la electrolisis, estarían en un grupo parecido al de los métodos químicos. Ofrecen mayores ventajas y resultados que los métodos físicos aunque no son tan simples [10].

La electrolisis es el método de limpieza que se va a aplicar en el desarrollo de este trabajo. En el Trabajo de Fin de Grado “*Recuperación electrolítica de piezas de acero oxidadas*”, de Enrique Díaz Zuaza [1] se estudió este proceso y se llegaron a una serie de conclusiones reflejadas en una serie de ventajas y desventajas de este método de limpieza. Es por ello necesario indicar las ventajas e inconvenientes que ofrece este método de limpieza con respecto a otros como los que se han mencionado:

Ventajas de la electrolisis:

- Procedimiento económico.
- No requiere ni altos conocimientos de la materia ni la necesidad de experiencia.
- No implica un gasto de tiempo elevado.
- No implica el uso de productos abrasivos que puedan deteriorar la superficie de la pieza a recuperar.
- No es necesaria una limpieza previa de las piezas.
- Una corrosión avanzada en la pieza no impide que sea efectivo.
- No existe liberación de gases nocivos o irritantes.

Como se ha indicado, no existe un método perfecto o sin desventajas frente a otros métodos de limpieza. Entre los inconvenientes del método electrolítico destacan los siguientes:

- Ennegrecimiento de la superficie metálica. En ocasiones es necesaria una limpieza posterior a la electrolisis.
- Gasto de tiempo en la limpieza.
- Implica la utilización de corriente eléctrica.

## 2.3 Tratamiento de superficies (TTS)

Hoy en día se usa el termino TTS para hablar de los tratamientos superficiales. Sin embargo, las siglas TTS realmente se corresponden con Túnel de Tratamiento de Superficies. El concepto es el de realizar una serie de tratamientos superficiales siguiendo una línea con diferentes procesos por la cual van pasando las piezas a tratar

Antes de proceder al pintado de una pieza, es necesario que ésta pase por una serie de procesos previos. Estos procesos preparan a la pieza para conseguir un buen adherimiento de la pintura durante la cataforesis. Básicamente, el TTS consiste en una serie de baños con productos químicos y agua, en los cuales se desengrasa y se lava la pieza, posteriormente se trata y por último se lava y se desengrasa de nuevo. En la fase de tratamiento se le añade una capa o de fosfatos de diferentes metales (TTS Clásico), o de hidróxidos de silanos y diversos metales (TTS Verde). Podemos entonces diferenciar dos líneas de TTS [3]:

- TTS Clásico o Fosfatación: desengrases, enjuagues, afinado, fosfatado, enjuagues con agua industrial, pasivado (en el caso de que lo hubiera), enjuagues con agua desionizada y escurrido.



Figura 2-2 Etapas del TTS Clásico

- TTS Verde: desengrases, enjuagues, conversión, enjuagues con agua desionizada y escurrido.



Figura 2-3 Etapas del TTS Verde

Las diferentes etapas del proceso de Tratamiento de Superficies (ver Figura 2-2 y Figura 2-3) son las siguientes:

- Desengrases: su función es retirar la suciedad no adherida y los aceites de protección de la pieza. Se usan productos alcalinos y tensoactivos.
- Enjuagues: su función es retirar los restos de los productos de etapas anteriores. Se realiza con agua industrial en las etapas intermedias y con agua desionizada para evitar la contaminación de la etapa posterior.
- Escurrido: es la última etapa del proceso y su función es evitar trasvases a la cataforesis.

Además en el TTS Clásico existen las siguientes etapas (ver Figura 2-2):

- Afinado: sobre la superficie de la pieza se esparcen gérmenes de cristalización para permitir que se formen cristales homogéneos que cubran toda la superficie en la etapa de fosfatación.
- Fosfatación: se ataca la pieza con ácido fosfórico, dejando la superficie irregular para que posteriormente se adhiera a ella la capa de cataforesis.
- Pasivado: es una etapa opcional cuya función es proteger la superficie de la corrosión que sella los microespacios microcristalinos.

En el TTS Verde (ver Figura 2-3):

- Conversión: etapa en la cual se depositan sobre la superficie de la pieza una capa de hidróxidos de Zirconio, silanos y diversos metales.

Se ha de mencionar que el TTS Verde ha ido sustituyendo al TTS Clásico debido a motivos económicos. Las principales ventajas del TTS Verde frente al TTS Clásico son la reducción de

residuos producidos y la disminución del consumo de energía y materias primas utilizadas durante el proceso. A pesar de ello mantiene la calidad de la Fosfatación. Recibe el nombre de TTS Verde debido a que es menos tóxico y ahorra energía, agua y materias [3].

## 2.4 Cataforesis

La cataforesis o electrodeposición es un método de pintado por inmersión cuyo fundamento es el desplazamiento de partículas de pintura cargadas positivamente hacia el polo opuesto, en este caso, la pieza que se va a pintar. Estas piezas se sumergen en un baño de pintura diluida con agua. Las moléculas de pintura, al aplicar una diferencia de potencial eléctrica, se rompen y se depositan sobre la pieza al verse atraídas por su carga eléctrica [11].

Este método de pintado se aplica, debido a la necesidad de conducción de la corriente eléctrica, únicamente a piezas metálicas. Se logra así una película de pintura uniforme, incluso en zonas a priori más complicadas de pintar como pueden ser interiores o cuerpos huecos. La cataforesis aporta una gran resistencia a deformaciones mecánicas y una gran protección anticorrosiva [12].

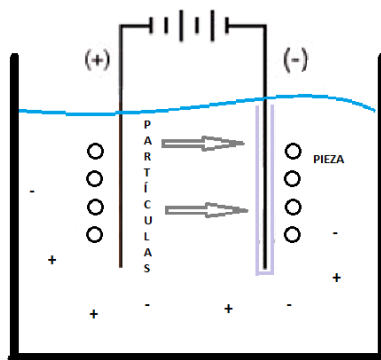


Figura 2-4 Esquema básico de una cataforesis

Para que el pintado por cataforesis se produzca de manera óptima, se han de cumplir una serie de condiciones:

- Como se ha mencionado, las superficies a pintar deben ser de materiales conductores.
- Previamente al pintado, las superficies deben pasar por una serie de tratamientos (TTS) que permitan que las superficies queden limpias y desengrasadas de manera que faciliten un buen adherimiento de la capa de pintura.
- Es necesario que el baño de cataforesis esté en continua agitación para evitar sedimentación en el baño y asegurar una electrodeposición uniforme.
- Es un proceso que implica el uso de corriente eléctrica.

Además de estas condiciones, hay una serie de factores principales que son los que hay que regular para completar el proceso de cataforesis de la manera más óptima:

- Voltaje: para una electrodeposición óptima se debe establecer un voltaje adecuado en función del tipo de pintura, diseño de la instalación, relación de superficie entre el ánodo y el cátodo, etc.
- Tiempo de electrodeposición: es un factor que influye directamente en el espesor de la capa adherida.
- Temperatura: se debe controlar la temperatura durante el proceso de pintado puesto que la electrodeposición se genera calor y por lo tanto la temperatura tiende a aumentar durante el proceso. Se debe mantener una temperatura uniforme para conseguir un resultado óptimo.

- Agitación: al igual que el resto de factores principales, se debe mantener en un punto uniforme. Un exceso de agitación provocaría turbulencias en el baño que afectarían a la velocidad de electrodeposición. La falta de agitación provocaría la sedimentación de los componentes pigmentarios [12].

### 2.4.1 Ventajas de la cataforesis

La cataforesis no es el único método de pintado de piezas. Otros sistemas de pintado que pueden realizarse hoy en día son [13]:

- Pintado por aplicación directa: la pintura se aplica con instrumentos como rodillos, brochas, etc. La aplicación de pintura por medio de este método suele ser lenta y con acabados de baja calidad.
- Pintado por impresión: se utilizan prensas, inyecciones de tinta o también a través de máscaras. Se emplea para marcar las piezas metálicas o dibujar sobre piezas de plástico.
- Pintado por proyección y pulverización: son unos sistemas muy utilizados debido a que no necesitan grandes instalaciones, son rápidas y presentan buenos acabados. Básicamente se trata de deshacer el producto líquido en finísimas partículas que se adhieren a la superficie a pintar debido a la presión que se les aplica.
- Pintado por inmersión: aquí estaría la cataforesis. Dentro de los pintados por inmersión podemos distinguir dos grupos.
  - Galvanizado en caliente: el galvanizado en caliente consiste en sumergir las piezas a pintar en cubas a altas temperaturas. Se caracteriza por un gran poder de penetración pero no consigue un buen acabado superficial, donde es normal la aparición de burbujas en las superficies pintadas.
  - Galvanizado electroforético: que puede ser por cataforesis o anaforesis. Similar al anterior pero sustituyendo las altas temperaturas de la cuba por una aplicación de corriente. Los resultados son considerablemente mejores. En la anaforesis el metal va conectado al polo positivo (ánodo). Se encuentra en desuso debido a su poca calidad de acabado al compararlo con la cataforesis. En la cataforesis el metal va conectado al polo negativo (cátodo) y destaca por su buen acabado y su poder de penetración.

En la siguiente tabla vemos una comparación entre la anaforesis y la cataforesis:

PROPIEDADES	ANÓDICA	CATÓDICA
Resistencia a la cámara de niebla salina de más de 240 horas	Sí	Sí
Resistencia a la cámara de niebla salina de más de 1000 horas	No	Sí
Resistencia a los ultravioletas	Sí	No/Sí*
Resistencia a álcalis	No	Sí
Poder de penetración	Pobre	Muy bueno
Rango de color	Bueno	Bueno
Resistencia química	Pobre	Buena

\*Algunos productos especiales satisfacen las condiciones requeridas

**Tabla 1 Comparativa Anaforesis – Cataforesis [12]**

Una vez se han mencionado otros tipos de pintado, podemos destacar las siguientes ventajas de la cataforesis [12]:

- Ahorro de costes: hoy en día el proceso de cataforesis es un método muy automatizado, lo cual implica una reducción de los costes.

- Alto rendimiento del material: la cataforesis implica unas pérdidas mínimas si la comparamos con otros métodos, como por ejemplo, la pulverización de pinturas.
- Uniformidad en los espesores de las películas de pintura adheridas.
- Penetración: facilidad para pintar zonas poco accesibles como interiores.
- Resistencia a la corrosión: debido a la capacidad de aplicar la pintura en zonas de difícil acceso.
- Reducción de impacto ambiental.

## 2.5 El módulo elástico

El módulo elástico o módulo de Young es un parámetro que indica la relación existente en un cuerpo sólido entre la tensión y la deformación durante su comportamiento elástico. Se expresa en unidades de tensión mecánica (MPa). Se puede expresar de la siguiente manera [14]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Conociendo que:

- $E$  es el módulo de Young.
- $\sigma$  es la tensión ejercida sobre el material.
- $\varepsilon$  es la deformación del material.

En el siguiente gráfico vemos representado un ejemplo de un diagrama tensión-deformación. Donde se distinguen los diferentes comportamientos del material al ser sometido a una tensión:

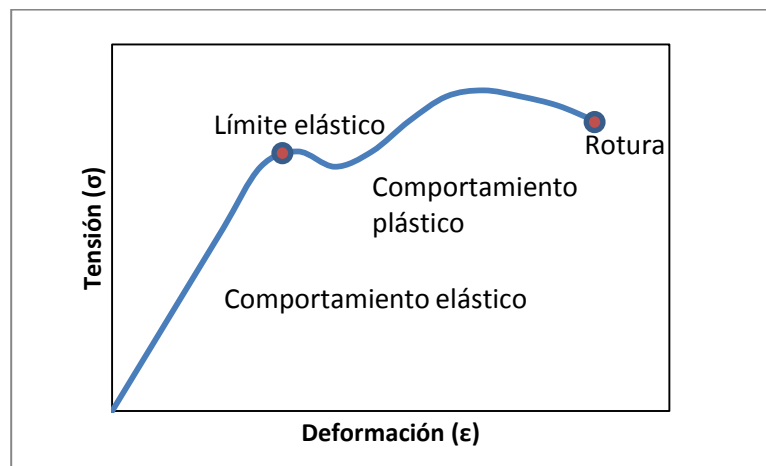


Figura 2-5 Diagrama Tensión-Deformación

En el cual:

- Comportamiento elástico: el material se deforma al ser sometido a diferentes tensiones pero recupera su forma original una vez deja de ser sometido a las mismas.
- Comportamiento plástico: el material se deforma de manera permanente. Sucede cuando las tensiones a las que es sometido superan su límite elástico.
- Rotura: fractura del material.

Como hemos mencionado anteriormente, el módulo elástico es un parámetro característico de la zona de comportamiento elástico de una pieza, que es la zona en la que se trabaja con las varillas de acero de nuestro proyecto. Al someterse a los ensayos dichas varillas se deforman, pero una vez retiradas las cargas, vuelven a su estado original.



## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Metodología

#### 3.1.1 Introducción

Previamente a explicar cómo se ha desarrollado este trabajo, se debe hablar del módulo de varillas sobre el que se sustenta este trabajo. Cada módulo de varillas cuenta con un total de cinco modelos diferentes de piezas de acero. Es por ello, que para el desarrollo de este trabajo se someten a estudio diez varillas (dos de cada tipo) más una undécima varilla que hacen un total de once piezas para estudio. Las características de las piezas son las siguientes:

- Tipo 1: varilla de acero 10mm x 1,5mm x 500mm (x2).
- Tipo 2: varilla de acero 10mm x 2mm x 500mm (x2).
- Tipo 3: varilla de acero 10mm x 3mm x 500mm (x2).
- Tipo 4: varilla de acero 15mm x 1,5 mm x 500mm (x3).
- Tipo 5: varilla de acero 20mm x 1,5 mm x 500mm (x2).

En la siguiente imagen vemos uno de los modelos de varilla, en este caso corresponde al modelo de varilla 20mm x 1,5 mm x 500mm:



**Figura 3-1 Varilla 20mm x 1,5mm x 500mm**

Para hacer la clasificación de las piezas de una manera más sencilla, se han numerado de la siguiente manera:

- Las Piezas 1 y 2 se corresponden con la varilla Tipo 1 de 10 mm x 1,5 mm.
- Las Piezas 3 y 4 se corresponden con la varilla Tipo 2 de 10 mm x 2 mm.
- Las Piezas 5 y 6 se corresponden con la varilla Tipo 3 de 10 mm x 3 mm.

- Las Piezas 7 y 8 se corresponden con la varilla de Tipo 4 15 mm x 1,5 mm.
- Las Piezas 9 y 10 se corresponden con la varilla de Tipo 5 20 mm x 1,5 mm.
- La Pieza 11 se corresponde con la varilla restante de Tipo 4 15 mm x 1,5 mm.

### 3.1.2 Fases del proyecto

Como ya se ha mencionado, en el desarrollo de este trabajo se pueden distinguir tres fases bien diferenciadas. Una fase de limpieza de las piezas, una de tratamiento de las mismas y por último una fase de evaluación de resultados. Además, durante todo el desarrollo se han tomado pesos y espesores de las piezas y se han fotografiado todos los procesos por los que han pasado. Las fotografías que se han tomado siguen siempre el mismo patrón: una imagen general de la pieza y dos vistas de microscopio a diferentes aumentos. En el siguiente esquema podemos ver de manera clara las fases por la que ha pasado este trabajo:

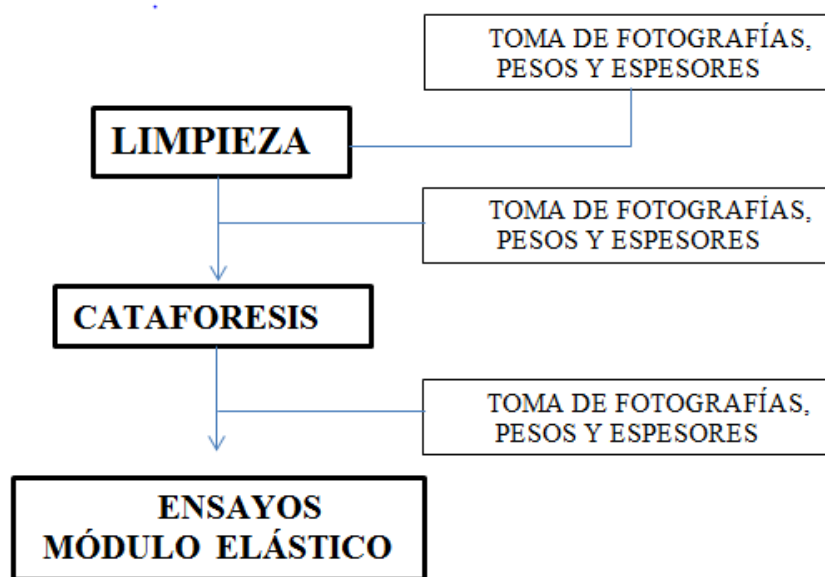


Figura 3-2 Esquema General Desarrollo del Trabajo

Cabe señalar que el material de laboratorio utilizado a lo largo del trabajo para toma de medidas que se utiliza es el siguiente:

- Cinta métrica.
- Micrómetro.
- Báscula.
- Cámara fotográfica Cannon.
- Microscopio A. KRUSS OPTRONIC.
- Medidor de conductividad.
- Medidor de pH.



**Figura 3-3 Microscopio A. KRUSS OPTRONIC**

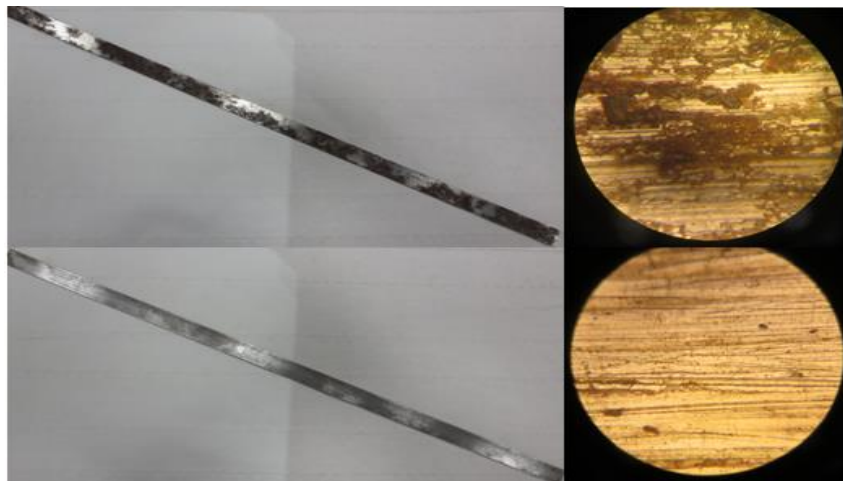
En un principio, se plantea el uso de un espesímetro para tomar medidas de los espesores de las varillas. Sin embargo, la cataforesis es un proceso muy aislante que impide dicha operación. Para medir el espesor de una varilla pintada por cataforesis se necesita un espesímetro de unas características que no están a nuestro alcance. Es por ello que se usa el micrómetro para tomar estos espesores. El micrómetro nos da una idea del espesor pero no es tan exacto como podría ser un espesímetro.

### *3.1.3 Limpieza de las varillas*

Como se ha mencionado, previamente a la primera fase del proyecto, se realizan fotografías y se toman pesos y espesores de las piezas. Las fotografías del estado inicial de las varillas pueden verse en el ANEXO II: Fotografías piezas inicialmente. Una vez se han tomado los datos necesarios, se procede a realizar la limpieza, que se puede dividir en dos procesos: lijado y limpieza electrolítica.

#### **3.1.3.1 Lijado de las varillas**

Tras realizar una primera prueba experimental en la cual el resultado no es el esperado, se decide realizar un lijado a todas las piezas para reducir el óxido de la superficie y conseguir un mejor resultado en la limpieza electrolítica. En la siguiente imagen podemos ver el antes y el después de una de las varillas tras el lijado:



**Figura 3-4 Pieza 11 Antes y después de Lijado**

Podemos apreciar que la mayoría del óxido es superficial, puesto que prácticamente con un lijado dejamos la varilla limpia.

### 3.1.3.2 Limpieza electrolítica

Para la celda electrolítica, se han utilizado los siguientes materiales y recursos de laboratorio:

- Electrolito básico (NaOH, ANALEMA 98%).
- Cátodo (Piezas de Acero).
- Ánodo (Grafito).
- Fuente de alimentación.
- Recipiente de plástico.



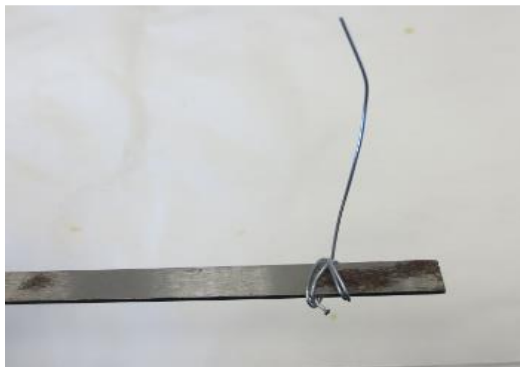
**Figura 3-5 Recipiente de plástico**

De las once piezas con las que contamos, diez de ellas son sometidas a la limpieza electrolítica (de la Pieza 1 a la Pieza 10) y la undécima únicamente es sometida al lijado (Pieza 11). Para realizar la limpieza electrolítica nos hemos basado en el resultado más óptimo del Trabajo de Fin de Grado “*Optimización de la limpieza electrolítica de sustratos metálicos oxidados*” de Javier Lora García [2]. Como ya se ha mencionado, en este trabajo se evaluaron diferentes factores de la limpieza electrolítica como la concentración y el medio de la disolución, el tiempo y el voltaje. Tras analizar los resultados obtenidos por Javier Lora García, se decide realizar nuestra celda electrolítica con los siguientes parámetros:

- Medio de la disolución: básico (NaOH).
- Concentración de la disolución: 2,5%.
- Intensidad de corriente: 2 A.
- Tiempo: 10 minutos.

Para la concentración de la disolución al 2,5% se necesitan un total de 77,85 gramos de soluto (NaOH), siendo el volumen de disolución de tres litros. Los datos para este cálculo, al igual que el resto de parámetros han sido extraídos del Trabajo de Fin de Grado [2] mencionado.

Una vez elaborada la disolución se procede a montar el resto de la celda. El ánodo, en este caso el grafito, se conecta al polo positivo de la fuente de alimentación. El cátodo, cada una de las piezas de acero, va conectado al polo negativo de la fuente de alimentación. Se debe indicar que sobre el extremo de las piezas de acero al que va conectada la fuente de alimentación se coloca un alambre para permitir que la pieza se sumerja por completo en la disolución:



**Figura 3-6 Colocación del alambre**

En la siguiente imagen podemos ver el montaje completo de nuestra celda electrolítica:



**Figura 3-7 Montaje de Celda Electrolítica**

Todas las piezas permanecen sumergidas en la celda electrolítica con la fuente de alimentación en funcionamiento un total de diez minutos. Al finalizar esta fase del trabajo, se vuelven a tomar pesos y espesores de las piezas y se toman fotografías de las mismas (ver ANEXO III: Fotografías piezas tras limpieza).

#### *3.1.4 Tratamiento Superficial, Cataforesis y Pintado*

La siguiente fase del trabajo consiste en tratar las piezas que ya están limpias. Previamente a aplicar una capa de pintura sobre las varillas, éstas deben pasar por una serie de tratamientos superficiales. Los materiales y recursos utilizados para elaborar la línea de tratamiento superficial son los siguientes:

- Desengrasante jabonoso.
- Agua desionizada.
- Recipiente de plástico.
- Producto químico Oxsilan (ver ANEXO VI: Ficha Técnica Oxsilan).

Y la línea seguida por las piezas es la siguiente:

1. Desengrase.
2. Lavado con agua industrial.
3. Baño químico con Oxsilan.
4. Lavado con agua desionizada.
5. Secado.

Inicialmente, sobre las piezas se aplica el desengrasante jabonoso para eliminar restos superficiales que pudiera haber. Posteriormente, se aplica un lavado con agua industrial y se introducen las piezas

en la fuente de plástico que contiene el producto químico Oxsilan. Tras estar sumergidas en el baño químico de cinco a diez minutos se lavan con agua desionizada. Por último se secan a temperatura ambiente.

Una vez todas las piezas han pasado por la línea de tratamiento superficial, se divide la parte de pintado en dos procesos diferentes. Mientras que las piezas de la 1 a la 9 se someten a un pintado por cataforesis, Las piezas restantes (Piezas 10 y 11) se tratan con una pintura antioxidante.

#### **3.1.4.1 Pintado por Cataforesis**

Para la el pintado por cataforesis los elementos utilizados son los siguientes:

- Pasta y ligante.
- Recipiente de plástico.
- Fuentes de alimentación.
- Ánodo.
- Cátodo.
- Estufa.

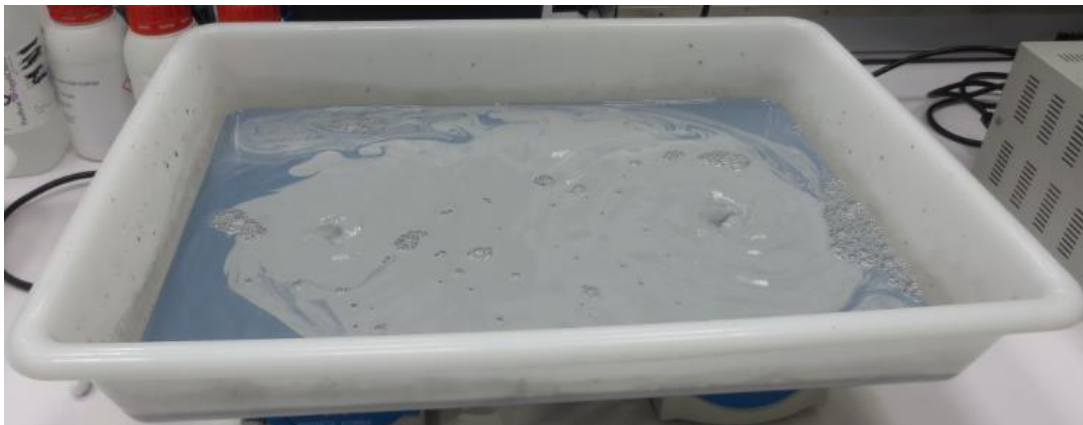
Los parámetros de aplicación que se utilizan en la empresa Citroën para el proceso de cataforesis son proporcionados por el Dr. Miguel Núñez Díaz, cuya Tesis Doctoral "*Reducción de partículas ocluidas en carrocería cataforizada en una instalación de pintura de automóviles*" [3] es uno de los trabajos en los que se basa este proyecto. A continuación se muestran los parámetros usados por la empresa Citroën para conseguir un espesor de 15  $\mu\text{m}$ , que se considera suficiente para garantizar más de 15 años de protección anticorrosión:

- Voltaje: 320 V.
- Temperatura del Baño: 32 °C.
- Temperatura de cocción: mínimo 14 minutos a 165 °C.
- Tiempo de baño: 155 segundos.
- Concentración de Pasta y Ligante:  $\frac{1}{4}$ .

Ante la imposibilidad, por falta de medios, de realizar un baño con estas características, se adaptan estos parámetros para poder realizar un baño de cataforesis en el laboratorio. Los valores finales de los parámetros son los siguientes, decidiendo aplicar tres voltajes diferentes para estudiar posibles variaciones de resultado:

- Voltaje: 180 V - 120 V - 60 V.
- Temperatura del baño: Temperatura ambiente.
- Estufado: 25 minutos a 170 °C.
- Tiempo de baño: 180 segundos.
- Concentración de Pasta y Ligante:  $\frac{1}{4}$ .

Al tener la pasta y el ligante mayor densidad que la pintura, es necesario homogenizar el baño, mezclándolo antes de empezar con el proceso. Para ello como se observa en la Figura 3-8 Momento de mezclado del baño se utilizan agitadores magnéticos para homogenizarlo. Al igual que en la celda electrolítica, para sumergir las piezas por completo en el baño se utiliza un alambre en el extremo de la varilla al que va conectado la fuente de alimentación.



**Figura 3-8 Momento de mezclado del baño**

En este caso, las varillas que se pintan actúan como cátodo (polo negativo), y, como ánodo (polo positivo), una varilla de acero que también se ha limpiado pero no forma parte del estudio, sino que cumple únicamente la función de electrodo. Antes de iniciar el proceso, se toman datos de la conductividad y el pH del baño:

- Conductividad: 915  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .
- pH: 6.15.

Como última acción, se distribuyen las varillas para aplicar los diferentes voltajes, quedando de la siguiente forma:

- Voltaje 180 V: Piezas 1, 3 y 5.
- Voltaje 120 V: Piezas 7, 9 y 2.
- Voltaje 60 V: Piezas 4, 6 y 8.

Para aplicar 180 V de voltaje, es necesario conectar en serie hasta tres fuentes de alimentación, dado que el voltaje máximo de una sola fuente es de 60 V. En la siguiente imagen vemos dos de las tres fuentes de alimentación conectadas en serie:



**Figura 3-9 Fuentes de alimentación**

Se sumergen un total de 9 piezas en el baño de cataforesis, estando cada una de ellas tres minutos sumergidas y 25 minutos en la estufa. Al finalizar el proceso, se toman de nuevo datos del peso y el espesor y se toman fotografías del resultado como se pueden ver en el ANEXO IV: Fotografías piezas tras pintado.





Figura 3-10 Toma de vista microscópica tras cataforesis

### 3.1.4.2 Pintado con pintura antioxidante

Sobre las piezas restantes, se aplica una única capa de pintura a mano, dejándolas secar a temperatura ambiente. Se utiliza una brocha convencional para realizar la operación. Al igual que con todas las operaciones anteriores, se toman fotografías (ver ANEXO IV: Fotografías piezas tras pintado) y datos sobre los nuevos pesos y espesores.



Figura 3-11 Pintura Antioxidante HAMMERITE

### 3.1.5 Determinación del Módulo Elástico

Para esta última fase del desarrollo, el material de laboratorio utilizado es el material utilizado en la práctica de Resistencia de Materiales “*Determinación Módulo Elástico*” [15]:

- Elementos de soporte.
- Extensómetro de aguja.
- Flexómetro.
- Pesas.
- Soporte para pesas.
- Dinamómetro.

En la siguiente imagen vemos el montaje de todos estos elementos:





**Figura 3-12 Montaje "Determinación del Módulo Elástico"**

Al finalizar todos los procesos de recuperación y tratamientos superficiales sobre las piezas, la parte final del trabajo, como ya se ha mencionado, consiste en estudiar el comportamiento de estas “nuevas” varillas en la realización de las prácticas en las que eran usadas con anterioridad. Lo que se pretende con la práctica de la asignatura de Resistencia de Materiales es que el alumno halle el valor del módulo de elástico de diferentes materiales estudiando la deformación que se produce en una viga biapoyada en sus extremos al colocar una carga en su punto medio [15].

Las piezas de acero serían las vigas sobre las que se aplican estas cargas. Sobre estas varillas, apoyadas en sus extremos, se van aplicando cargas puntuales en su punto medio para observar su deformación vertical. Esto se realiza a varillas de diferentes grosores y anchuras. Con los datos obtenidos los alumnos calculan los módulos elásticos de las diferentes piezas.

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de los ensayos que se realizaron:



**Figura 3-13 Ensayo de flexión pieza 11**

Se puede demostrar que la flecha en el punto medio de la barra biapoyada en sus extremos es prácticamente en su totalidad a causa de la flexión de la pieza para casos en los que la longitud entre apoyos es mucho mayor que el canto de la viga. En nuestro caso, las varillas tienen todas una longitud de 500 mm y el mayor de los cantos un grosor de 3 mm, por lo que se cumple la condición necesaria.

Siendo la expresión:

$$f = \frac{1}{4Eb} \left(\frac{L}{a}\right)^3 F$$

Y siendo los parámetros:

- a: espesor (canto) de la viga.

- b: ancho de la viga.
- L: distancia entre apoyos.
- E: módulo elástico.
- F: fuerza, carga que actúa en el punto medio entre apoyos.

Sabiendo todo esto, se realizan los ensayos sobre las once varillas y posteriormente se hallan sus módulos elásticos. Los módulos hallados se comparan posteriormente con los del fabricante.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Fases del proyecto

Como se muestra en la Figura 3-2 Esquema General Desarrollo del Trabajo, este proyecto se divide en tres fases bien diferenciadas, y, como se ha indicado, antes de cada uno de estos procesos principales se han tomado diferentes medidas:

Previamente a la limpieza, se toman los pesos y espesores de todas las piezas:

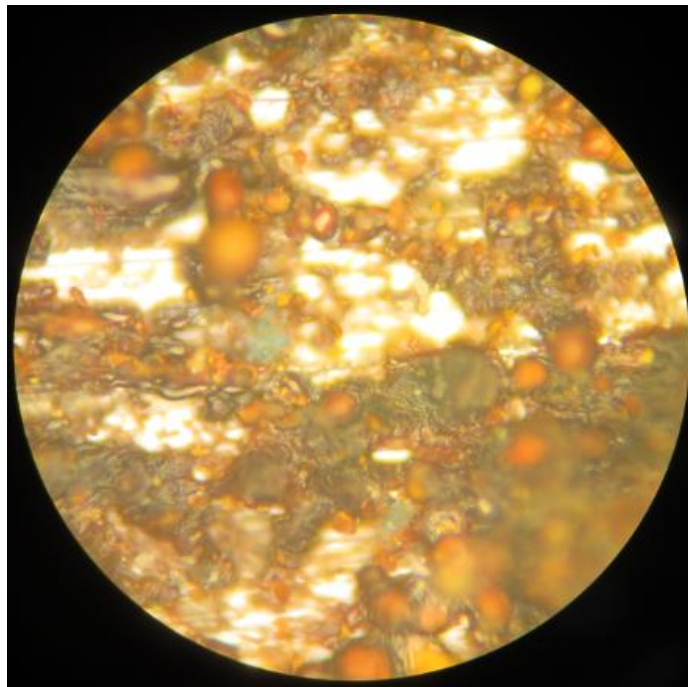
PIEZA	PESO (g)	ESPEJOR (mm)
PIEZA 1	60.23	1.52
PIEZA 2	61.15	1.64
PIEZA 3	81.01	2.06
PIEZA 4	81.09	2.09
PIEZA 5	120.6	3.07
PIEZA 6	120.7	3.16
PIEZA 7	90.25	1.59
PIEZA 8	90.37	1.62
PIEZA 9	119.16	1.62
PIEZA 10	119.77	1.64
PIEZA 11	90.94	1.59

Tabla 2 Pesos y Espesores Antes de Limpieza

En la siguiente imagen vemos un ejemplo del estado en el que se encuentran las piezas inicialmente:



**Figura 4-1 Vista general Pieza 8**



**Figura 4-2 Vista al Microscopio Pieza 8**

## **4.2 Limpieza**

Tras realizar la limpieza, que incluye lijado y electrolisis, se toman los nuevos pesos y espesores, los cuales se aprecian en la siguiente tabla:

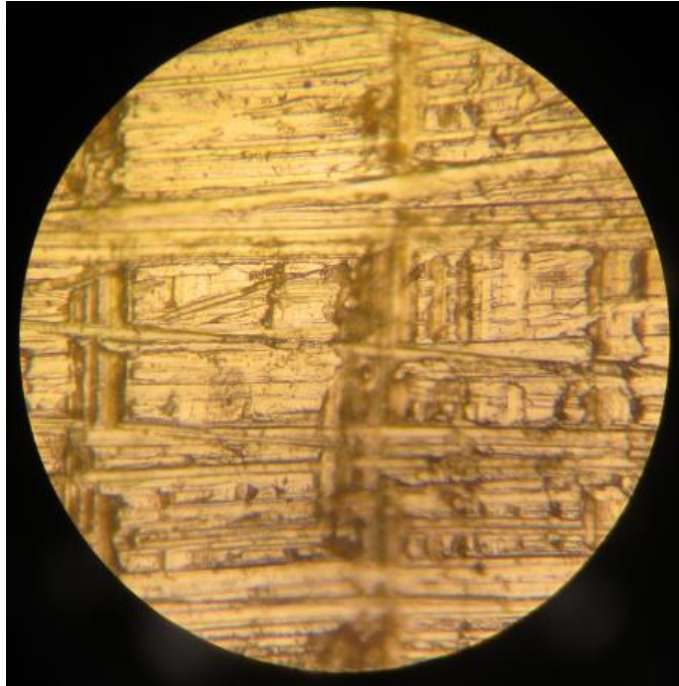
PIEZA	PESO (g)	ESPESOR (mm)	$\Delta$ PESO (g)	$\Delta$ ESPESOR (mm)
PIEZA 1	60.13	1.51	-0.10	-0.01
PIEZA 2	60.82	1.53	-0.33	-0.11
PIEZA 3	80.82	2.04	-0.19	-0.02
PIEZA 4	81.02	2.05	-0.07	-0.04
PIEZA 5	120.24	3.03	-0.36	-0.04
PIEZA 6	120.32	3.03	-0.38	-0.13
PIEZA 7	89.92	1.52	-0.33	-0.07
PIEZA 8	89.89	1.52	-0.48	-0.10
PIEZA 9	118.83	1.51	-0.33	-0.11
PIEZA 10	119.37	1.51	-0.40	-0.13
PIEZA 11	90.57	1.52	-0.37	-0.07

Tabla 3 Pesos y Espesores tras Limpieza Electrolítica

Como se puede observar, tras la limpieza los pesos de prácticamente todas las piezas tienen unos valores muy parecidos y los espesores son prácticamente iguales a los del fabricante. Se ha de destacar que la Pieza 11, al no haber sido sometida a la limpieza electrolítica, y únicamente haber sido lijada tiene un peso mayor que las Piezas 7 y 8, que poseen sus mismas dimensiones. Los resultados fueron más que aceptables, teniendo en cuenta que únicamente fueron 10 minutos de tratamiento electrolítico. Se consigue una limpieza apreciable tanto a simple vista como en la vista al microscopio. En la siguiente imagen vemos un ejemplo de una varilla tras pasar por la limpieza electrolítica:



Figura 4-3 Vista general Pieza 3



**Figura 4-4 Vista al Microscopio Pieza 3**

### **4.3 Tratamiento de superficies, cataforesis y pintado**

A pesar de realizar un proceso de cataforesis adaptado a nuestras limitaciones, los resultados finales fueron más que aceptables. Se ha de señalar que al realizarse sobre un recipiente plano, al colocar alambre únicamente en uno de los extremos de la varilla, la parte inferior de la misma queda igualmente pintada pero de una manera más defectuosa. Partículas de pintura sólida quedan adheridas a la superficie inferior de la pieza. Este problema se solucionaría colocando también un alambre en el extremo contrario. De este modo, toda la superficie inferior de la varilla quedaría suspendida y no pegada al fondo del recipiente. En la siguiente imagen vemos el estado final de una de las varillas:



**Figura 4-5 Vista general Pieza 4**

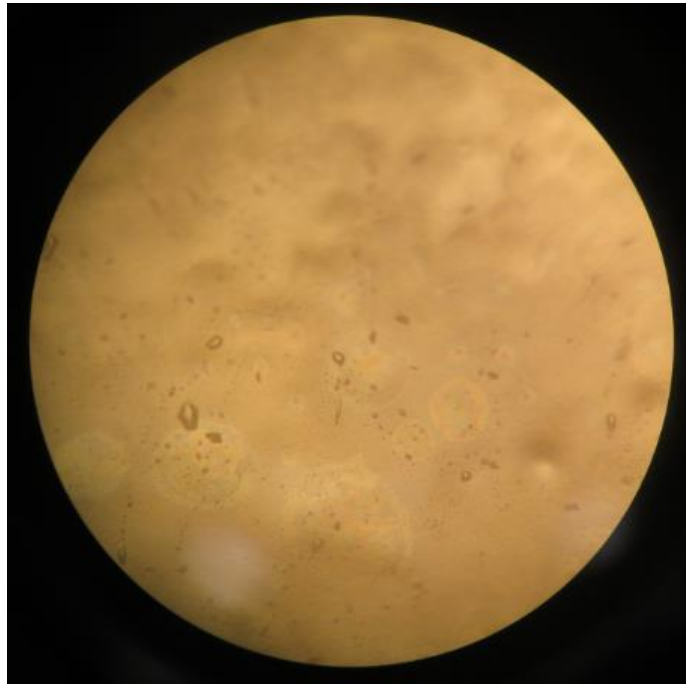


Figura 4-6 Vista al Microscopio Pieza 4

Tras el tratamiento de superficie y la cataforesis se toman de nuevo datos de pesos y espesores que vemos reflejados en la siguiente tabla:

PIEZA - VOLTAJE	PESO (g)	ESPESOR (mm)	$\Delta$ PESO (g)	$\Delta$ ESPESOR (mm)
PIEZA 1 – 180 V	61.31	1.64	<b>1.18</b>	<b>0.13</b>
PIEZA 2 – 120 V	61.54	1.61	<b>0.72</b>	<b>0.08</b>
PIEZA 3 – 180 V	82.26	2.09	<b>1.44</b>	<b>0.05</b>
PIEZA 4 – 60 V	81.33	2.13	<b>0.81</b>	<b>0.08</b>
PIEZA 5 – 180 V	121.17	3.11	<b>0.93</b>	<b>0.08</b>
PIEZA 6 – 60 V	121.15	3.13	<b>0.83</b>	<b>0.10</b>
PIEZA 7 – 120 V	91.01	1.61	<b>1.09</b>	<b>0.09</b>
PIEZA 8 – 60 V	90.95	1.59	<b>1.06</b>	<b>0.07</b>
PIEZA 9 – 120 V	120.31	1.62	<b>1.48</b>	<b>0.11</b>

Tabla 4 Pesos y Espesores tras Cataforesis

Como se puede observar, aquellas piezas que han sido sometidas a mayor voltaje tienen una diferencia de peso mayor que aquellas que han sido sometidas a un voltaje menor. En las piezas de menor volumen (de la Pieza 1 a la Pieza 4) se aprecia este hecho con más claridad que en las de mayor volumen (de la Pieza 5 a la Pieza 9), donde las diferencias están más ajustadas.

Esto se puede apreciar en la siguiente tabla, donde se muestran las medias de variación de peso y de espesor para cada voltaje. Además se incluye el espesor medio de la capa adherida en micras:

VOLTAJE	$\Delta$ PESO (g)	$\Delta$ ESPESOR (mm)	ESPESOR CAPA ( $\mu\text{m}$ )
180 V	1.183	0.086	43.333
120 V	1.097	0.093	46.667
60 V	0.900	0.083	41.667

**Tabla 5 Medias variación peso y espesor**

Las variaciones de espesor no cumplen lo previsto aunque se atribuye a la falta de ensayos realizados, pues únicamente tres medidas no llegan para establecer conseguir unos resultados concluyentes. Lo que si podemos asegurar es que los tres voltajes nos aseguran un espesor superior a  $15\mu\text{m}$ , que según el proveedor asegura más de 15 años de protección anticorrosión.

Como ya se ha mencionado, las Piezas 10 y 11 fueron tratadas con una pintura antioxidante. La siguiente imagen es un ejemplo de cómo han quedado las piezas tras pasar por un proceso de pintado manual:



**Figura 4-7 Vista general Pieza 10**



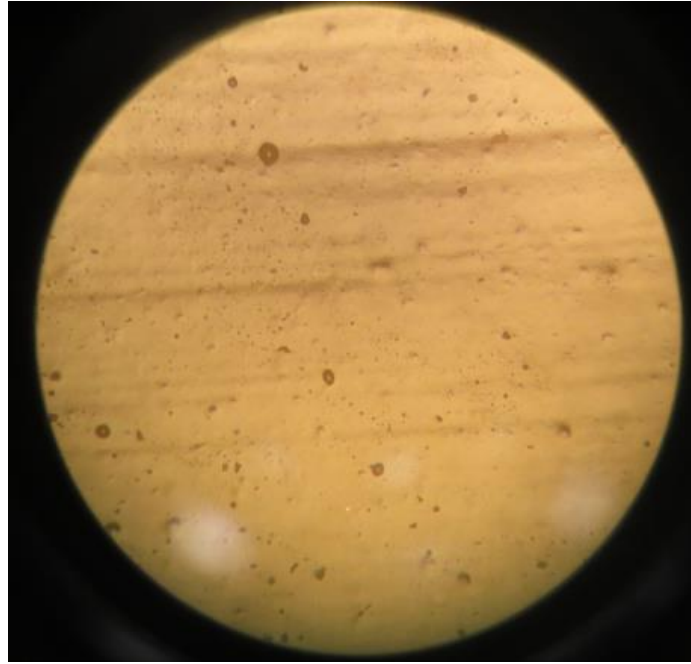


Figura 4-8 Vista al Microscopio Pieza 10

En la siguiente tabla vemos los nuevos pesos y espesores de las Piezas 10 y 11:

PIEZA	PESO (g)	ESPESOR (mm)	$\Delta$ PESO (g)	$\Delta$ ESPESOR (mm)
PIEZA 10	120	1.56	0.63	0.05
PIEZA 11	91.65	1.63	1.08	0.11

Tabla 6 Pesos y Espesores tras pintado

En la siguiente vemos la comparación entre las piezas de mismas dimensiones en función de si han pasado por el proceso de cataforesis o por el pintado manual. Como se ha mencionado, la Pieza 11 es similar a las Piezas 7 y 8:

PIEZA	PESO (g)	ESPESOR (mm)	$\Delta$ PESO (g)	$\Delta$ ESPESOR (mm)
PIEZA 7 – 120 V	91.01	1.61	1.09	0.09
PIEZA 8 – 60 V	90.95	1.59	1.06	0.07
PIEZA 11 – Pintura antioxidante	91.65	1.63	1.08	0.11
PIEZA 9 – 120 V	120.31	1.62	1.48	0.11
PIEZA 10 – Pintura antioxidante	120	1.56	0.63	0.05

Tabla 7 Comparativa Cataforesis - Pintado Manual

El hecho de que no haya similitud entre los resultados de las que han sido pintadas manualmente, comparadas con las que han pasado por el proceso de cataforesis, nos indica que el resultado final de estas piezas que han sido pintadas a mano no es algo que se pueda predecir previamente a pintarlas. Se observa que mientras que en la Pieza 11 la diferencia de peso sí que es similar al de las Piezas 7 y 8, en la Pieza 10 no ocurre lo mismo al compararla con la Pieza 9.

#### 4.4 Cálculo del Módulo Elástico

La última fase consiste en realizar la práctica de Resistencia de Materiales. Los valores obtenidos en esta práctica se vuelcan en tablas y gráficas (ver ANEXO V: Ensayos Módulo de elasticidad) para poder hallar el módulo elástico final. La siguiente figura es un ejemplo de las gráficas que se han realizado para resolver la práctica:

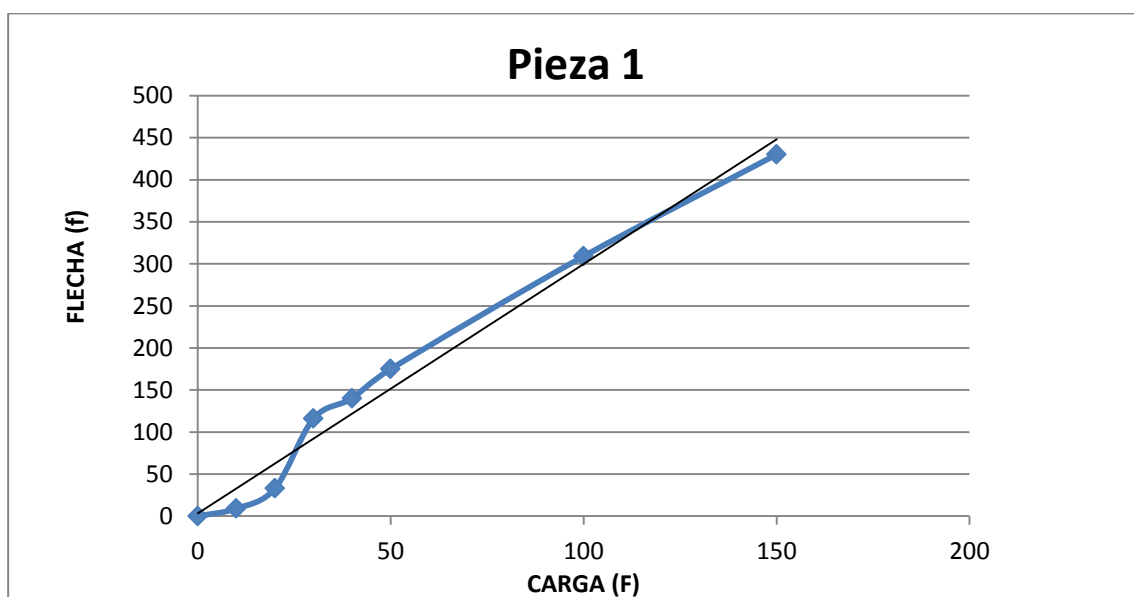


Figura 4-9 Ejemplo de ensayo de flexión Pieza 1

En la siguiente tabla se vuelcan los módulos elásticos calculados y se comparan con el módulo elástico del fabricante:

RECUPERACIÓN Y TRATAMIENTO SUPERFICIAL (TTS) DE PIEZAS USADAS  
EN LAS PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL CUD

TIPO DE VARILLA	PIEZA	Tratamiento	Módulo Elástico $\left(\frac{N}{m^2}\right)$	Módulo Elástico Fabricante $\left(\frac{N}{m^2}\right)$
VARILLA TIPO 1	Pieza 1	Cataforesis - 180 V	$2.277 * 10^{11}$	$2.059 * 10^{11}$
	Pieza 2	Cataforesis - 120 V	$2.653 * 10^{11}$	$2.059 * 10^{11}$
VARILLA TIPO 2	Pieza 3	Cataforesis - 180 V	$2.707 * 10^{11}$	$2.063 * 10^{11}$
	Pieza 4	Cataforesis - 60 V	$2.261 * 10^{11}$	$2.063 * 10^{11}$
VARILLA TIPO 3	Pieza 5	Cataforesis - 180 V	$2.242 * 10^{11}$	$2.171 * 10^{11}$
	Pieza 6	Cataforesis - 60 V	$2.037 * 10^{11}$	$2.171 * 10^{11}$
VARILLA TIPO 4	Pieza 7	Cataforesis - 120 V	$2.343 * 10^{11}$	$2.204 * 10^{11}$
	Pieza 8	Cataforesis - 60 V	$2.339 * 10^{11}$	$2.204 * 10^{11}$
	Pieza 11	Pintura antioxidante	$3.071 * 10^{11}$	$2.204 * 10^{11}$
VARILLA TIPO 5	Pieza 9	Cataforesis - 120 V	$3.378 * 10^{11}$	$2.111 * 10^{11}$
	Pieza 10	Pintura antioxidante	$3.376 * 10^{11}$	$2.111 * 10^{11}$

Tabla 8 Comparativa Módulo Elástico Obtenido-Fabricante

En los siguientes diagramas vemos lo resumido en la tabla de manera más gráfica, donde vemos el valor del módulo elástico del fabricante junto a los módulos elásticos calculados:

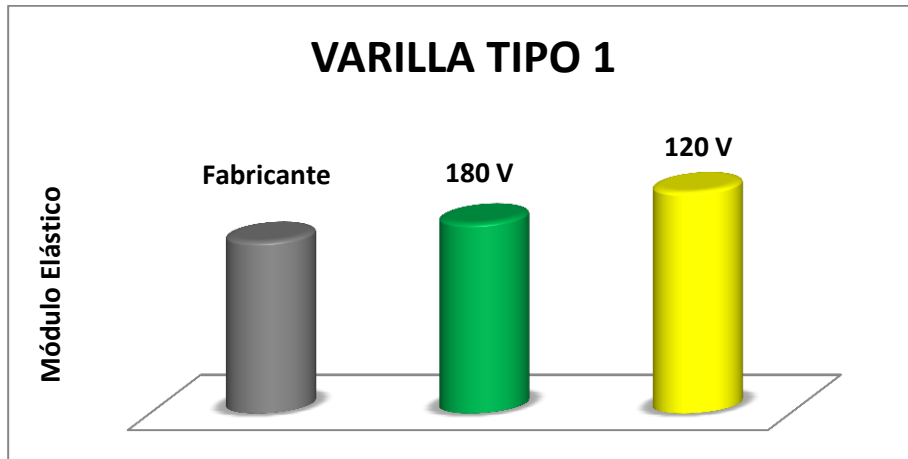


Figura 4-10 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 1

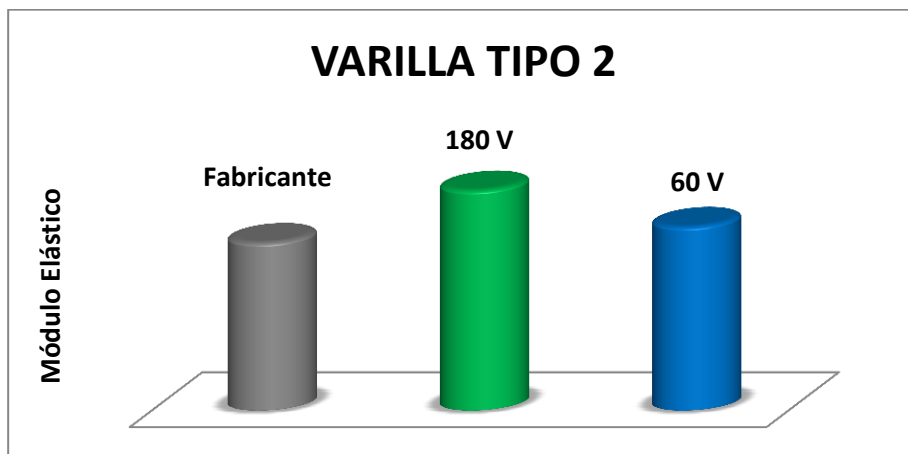


Figura 4-11 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 2

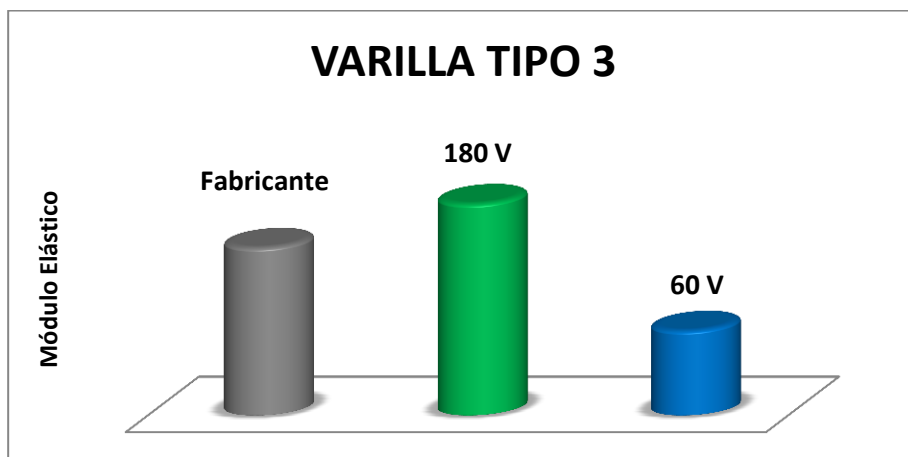


Figura 4-12 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 3

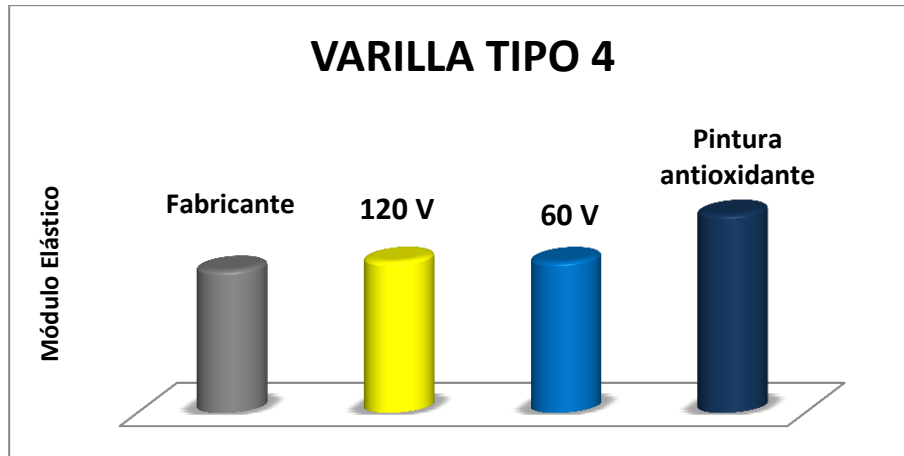


Figura 4-13 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 4

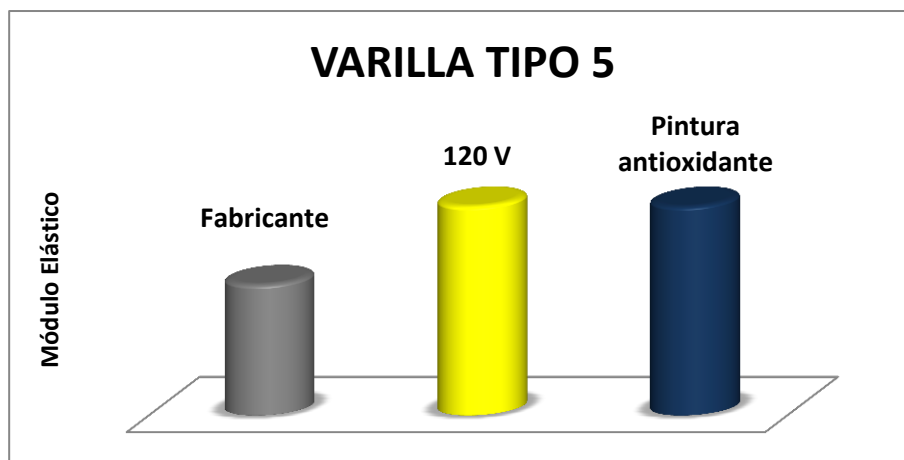


Figura 4-14 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 5

Debido a que ya desde el inicio, como se puede ver en la Tabla 2 Pesos y Espesores Antes de Limpieza, la Pieza 2 ha tenido un peso considerablemente mayor que el de la Pieza 1, el resultado final de este par de piezas no concuerda con el resto de resultados (Figura 4-10 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 1). La Pieza 6 se asume que son errores de realización durante los ensayos de flexión de la práctica, pues no tiene sentido que el módulo elástico sea menor tras aplicarle una capa de pintura a la pieza (Figura 4-12 Comparativa Módulos Elásticos Varilla 3).

Como se aprecia, a excepción de la primera pareja de varillas, como norma general en aquellas piezas sobre las que ha sido aplicado un menor voltaje, el módulo elástico es más similar al módulo elástico del fabricante. Esto puede explicarse de la siguiente manera: se observa que tras la cataforesis, aquellas varillas que han sido tratadas con mayor voltaje han tenido un aumento de peso y espesor mayor que el experimentado por las piezas sometidas a un menor voltaje (ver Tabla 4 Pesos y Espesores tras Cataforesis). Esto influye directamente en el cálculo del módulo elástico. Las varillas tras haber pasado por el pintado se vuelven más rígidas, lo cual les hace deformarse menos que las varillas originales sometidas a la misma carga. Podemos apreciarlo siguiendo la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{4Eb} \left(\frac{L}{a}\right)^3 F$$

Que realmente para cada tipo de varilla quedaría de la siguiente manera, ya que tienen las mismas dimensiones:

$$f = Cte \left(\frac{F}{E}\right)$$

Por lo tanto, para una misma carga aplicada ( $F$ ), la flecha ( $f$ ) será menor en aquellas piezas que tengan un módulo elástico mayor. Hemos observado que cuanto mayor es el voltaje aplicado, mayores son las capas adheridas y por lo tanto, mayor la rigidez de la pieza. Por lo tanto, las piezas sobre las que se han aplicado menores voltajes tienen unos módulos elásticos más similares a las varillas originales.

Todo esto también se aplica a las varillas que han sido pintadas manualmente, donde, al igual que en las Piezas 1 y 2, la diferencia de peso entre las Piezas 7 y 8 respecto a la Pieza 11 desemboca en un mayor módulo elástico de la Pieza 11. Las Piezas 9 y 10 sí que tienen un módulo elástico más similar. Se puede concluir que el módulo elástico depende del espesor de la capa adherida, pero como no hay ninguna manera de poder asegurar un espesor de capa con el pintado manual, no se puede predecir su módulo elástico.

Para finalizar, en la siguiente tabla se muestra la desviación de cada ensayo de manera porcentual sobre el módulo elástico del fabricante en función del voltaje:

VOLTAJE	1ª PIEZA	2ª PIEZA	3ª PIEZA	PROMEDIO
180 V	11%	31%	3%	15%
120 V	29%	6%	60%	32%
60 V	10%	6%	6%	7%

Tabla 9 Desviación porcentual según el voltaje

Como se mostraba anteriormente, se observa que las pruebas con 60 V de voltaje son las que menos se desvían del módulo de elasticidad original.

#### 4.5 Comparativa de las soluciones estudiadas

El fin de este trabajo es estudiar la viabilidad de un nuevo método para la reutilización del juego de varillas sobre las que gira este trabajo. Es por ello que una vez finalizada la parte experimental se deben analizar los resultados y establecer una comparación entre las tres posibles soluciones al problema en cuestión, que son:

- Adquisición de un nuevo juego de varillas.
- Limpieza, tratamiento y pintado por cataforesis a diferentes voltajes.
- Limpieza, tratamiento y pintado con pintura antioxidante.

De cada uno de estas posibles soluciones, se han escogido los siguientes parámetros para evaluación:

- Precio.
- Resistencia a la corrosión.
- Sencillez.
- Tiempo empleado.
- Residuos.
- Acabado.
- Módulo elástico.
- Corriente eléctrica.
- Posibilidad de implementarlo en prácticas.

Ha de mencionarse que el precio lo evaluamos en un período de 5 años, puesto que nos da una visión más acertada del mismo.

#### 4.5.1 Adquisición de un nuevo juego de varillas

A pesar de que este trabajo nace para encontrar una solución precisamente a este hecho, no se debe descartar que sea la solución más idónea. Es la solución que se lleva adoptando los últimos años.

##### 4.5.1.1 Ventajas

Entre las ventajas de esta solución destacan las siguientes:

- Sencillez: evidentemente es una solución sencilla (basta con pedir un nuevo juego a la empresa).
- Tiempo: prácticamente no implica ninguno.
- Acabado: el acabado es el de una pieza nueva.
- Módulo elástico: el módulo elástico de las piezas es el módulo elástico del fabricante.

##### 4.5.1.2 Inconvenientes

Como principales inconvenientes de esta solución hallamos los siguientes:

- Precio: el principal y por el que nace este trabajo, su alto coste año tras año. Aproximadamente unos 700 € anuales (ver ANEXO I: Precio Juego Varillas SIDILAB). En 5 años cerca de 3300 €.
- Resistencia a la corrosión: el otro inconveniente principal por el que nace este trabajo.
- Residuos: las varillas anteriores se convierten en residuos al llegar el nuevo juego de varillas

#### 4.5.2 Limpieza, tratamiento y pintado por cataforesis a diferentes voltajes

Es la solución principal que se ha tratado en este proyecto. Se han hecho pruebas a diferentes voltajes para intentar optimizar también el proceso de cataforesis.

##### 4.5.2.1 Ventajas

Entre las ventajas de esta solución destacan las siguientes:

- Resistencia a la corrosión: un proceso de cataforesis como el que se realiza, en el pintado de chapas de acero industrial asegura una durabilidad de más de 15 años ante la corrosión (en caso de no haber ralladuras). Esta es la principal ventaja frente al resto de soluciones.
- Precio: el coste total de esta solución se puede desglosar de la siguiente manera:

Para la Electrolisis:

- Precio Recipiente de plástico: 5,20 €.
- Precio 1 Kg Solute NaOH: 2 € (aprox).
- Precio 1 Litro Agua destilada: 1 € (aprox).
- Grafito: 1,5 €/m<sup>2</sup> (aprox).

Para el TTS y la Cataforesis:

- Precio Recipiente de plástico: 5,20 €.
- Según los datos proporcionados por el Dr. Miguel Núñez Díaz, el precio del proceso de cataforesis asciende a unos 0,11 €/m<sup>2</sup>.

Además, se ha de tener en cuenta la cantidad de corriente utilizada en ambos procesos:

- Precio Luz: despreciable.

Lo que nos da un total aproximado de no más de 50 € gastados en 5 años, teniendo en cuenta la utilización de un solo recipiente de plástico al año y que la superficie de total de 5 juegos de varillas a pintar es de aproximadamente 0.75 m<sup>2</sup>.

- Sencillez: no es tan sencillo como simplemente pedir unas piezas nuevas pero no es necesario tener unos conocimientos altos o una dilatada experiencia para poder llevarlo a cabo.

- Posibilidad de implementarlo en otras prácticas: esta solución pasa por diferentes fases como electrolisis o cataforesis que son procesos que los alumnos podrían realizar en otras prácticas de asignaturas como Química.

#### 4.5.2.2 Inconvenientes

A la hora de realizar este proyecto nos hemos encontrado con ciertos inconvenientes, entre los que destacan:

- Tiempo: es cierto que cada una de las fases de las prácticas implica un gasto de tiempo considerable si lo comparamos con la solución actual. Sin embargo, no es un problema de gran entidad.
- Acabado: a pesar de que la cataforesis asegura un acabado superficial muy bueno, al adaptar el proceso industrial a uno que se pudiera realizar en el laboratorio uno de los principales fallos fue el acabado de las caras inferiores de las piezas. Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, no es algo que no tenga solución.
- Residuos: es un proceso que genera residuos como el grafito o la pintura sobrante. A su favor, recupera las varillas usadas y los residuos se pueden almacenar y conservar.
- Módulo elástico: efectivamente el módulo elástico varía tras finalizar el proceso al compararlo con el módulo elástico del fabricante. Sin embargo, las variaciones no son tan grandes como para no poder realizar unas prácticas (ver Tabla 8 Comparativa Módulo Elástico Obtenido-Fabricante).
- El Producto químico Oxsilan, el desengrasante jabonoso y la Pasta y el ligante fueron proporcionados por el Dr. Don Miguel Núñez Díaz, lo cual no asegura el poder adquirir estos productos en ocasiones venideras.
- Precisa de corriente eléctrica para su realización.

#### 4.5.3 Limpieza tratamiento y pintado con pintura antioxidante

La última de las opciones estudiadas. Por falta de tiempo no se estudió en profundidad pero si se consiguieron sacar algunos resultados:

##### 4.5.3.1 Ventajas

Entre las ventajas de esta posible solución destacan:

- Precio: el coste total de este proceso lo podemos desglosar de la siguiente manera:
  - Bote de pintura 250mL: 5 € (aprox).
  - Brochas: 1 € ud (aprox).
  - Bote Disolvente 1 litro: 2 € (aprox).

Lo que nos da un total aproximado de no más de 20 € en 5 años. Lo que lo convierte en el método más económico.

- Resistencia a la corrosión: asegura una protección ante la corrosión de 8 años.
- Sencillez: únicamente consiste en aplicar una capa de pintura manualmente a unas piezas planas.
- No requiere el uso de corriente eléctrica.
- Residuos: no deja residuos de ningún tipo.

##### 4.5.3.2 Inconvenientes

Como principales inconvenientes de esta posible solución destacamos los siguientes:

- Acabado: se consigue un acabado irregular debido a que depende completamente de la habilidad del pintor.



- Tiempo: las piezas han de pintarse a mano. y esperando a que se seque una cara para poder pintar la otra.
- Módulo elástico: resultado similar al de las piezas que han sido cataforizadas pero que no se puede estipular previamente. Difiere del fabricante pero no es un error que impida la realización de las prácticas.
- No existe la posibilidad de implementarlo como una práctica de alguna asignatura.

#### 4.5.4 Resumen ventajas y desventajas

Una vez hemos visto las ventajas e inconvenientes de cada una de las opciones, vamos a elaborar una tabla para ver un resumen de todos los parámetros evaluados. Evidentemente, hay parámetros que tienen una importancia mayor que otros. Por ejemplo, el precio es un factor muy determinante ya que es la causa de este trabajo mientras que la implicación o no de corriente eléctrica en el proceso no lo es tanto. Es por ello que se elabora la tabla y se ponderan los factores del siguiente modo:

PARÁMETROS A EVALUAR:	PONDERACIÓN
PRECIO (5 AÑOS)	<b>1</b>
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN	<b>1</b>
MÓDULO ELÁSTICO	<b>0.5</b>
SENCILLEZ	<b>0.5</b>
TIEMPO	<b>0.5</b>
ACABADO	<b>0.25</b>
RESIDUOS	<b>0.25</b>
IMPLEMENTACIÓN EN PRÁCTICAS	<b>0.1</b>

**Tabla 10 Ponderaciones de los factores evaluados**

La forma de calcular el valor final es la siguiente:

1. Las ventajas o inconvenientes tendrán un valor de 0 a 2 para poder compararlas con las otras opciones. Por ejemplo, el coste del pintado manual es una ventaja comparado con la adquisición de piezas nuevas pero además lo es en comparación con el coste del pintado por cataforesis. Por lo tanto el precio del pintado manual tendría un valor de 2 y el de por cataforesis un 1.
2. Aquellos parámetros que sean contados como ventajas tienen valor positivo (1 o 2) y sumarán multiplicados por su coeficiente.
3. Aquellos parámetros contados como inconvenientes tendrán un valor negativo (-1 o -2) y restarán multiplicados por su coeficiente.
4. Aquellos parámetros que se han clasificado como inconvenientes o ventajas pero no lo sean en gran medida se multiplicarán por 0. Es decir, la diferencia de módulo elástico entre las piezas del fabricante y las tratadas es una desventaja para las tratadas, pero realmente no supondría un inconveniente real para el pintado por cataforesis, ya que se estima que el objetivo de las prácticas es aprender a calcular el módulo elástico y no es tan importante que realmente sea el del fabricante.

Queda por lo tanto la siguiente fórmula:

$$\sum (\text{Ventajas} \times \text{coeficiente}) - \sum (\text{Inconvenientes} \times \text{coeficiente}) = \text{Valor total}$$

En la siguiente tabla vemos reflejado lo anteriormente mencionado:

<b>FACTORES A EVALUAR:</b>	<b>PONDERACIÓN</b>	<b>ADQUISICIÓN JUEGO NUEVO</b>	<b>PINTADO MANUAL</b>	<b>TTS Y CATAFORESIS</b>
PRECIO (5 AÑOS)	1	-2	2	1
RESISTENCIA A LA CORROSIÓN	1	-2	1	2
MÓDULO ELÁSTICO	0,5	2	0	1
SENCILLEZ	0,5	2	1	1
TIEMPO	0,5	2	-1	-1
ACABADO	0,25	2	-1	1
RESIDUOS	0,25	-1	0	-1
IMPLEMENTACIÓN EN PRÁCTICAS	0,1	0	0	1
<b>VALOR TOTAL:</b>		<b>-0,75</b>	<b>2,75</b>	<b>3,6</b>

**Tabla 11 Comparativa posibles soluciones**

Como se puede apreciar el método de limpieza electrolítica, TTS y pintado por cataforesis es el método que mejor cumple los requisitos necesarios y ofrece los mejores resultados. Ha de indicarse que tanto los parámetros como su ponderación y puntuación se realizan con la máxima objetividad posible.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

La realización de este trabajo ha permitido encontrar una solución viable al problema planteado inicialmente. Además ha permitido evaluar los diferentes resultados de la cataforesis en función del voltaje empleado.

Gracias a los trabajos anteriores de los cuáles hemos partido se ha podido llevar a cabo la parte experimental del proyecto de manera satisfactoria.

Las conclusiones finales que se han establecido tras el desarrollo de este trabajo son las siguientes:

- Se han vuelto a confirmar los buenos resultados que ofrece la limpieza electrolítica, aunque es conveniente que en las piezas que están más corroídas se aumente el tiempo en el que están sometidas al proceso.
- El proceso que incluye una limpieza electrolítica, un tratamiento de superficies y un pintado por cataforesis es un proceso económico, sencillo y que asegura la perdurabilidad de las varillas. Esto lo convierte en una solución viable frente a la compra de nuevos juegos de varillas.
- La cataforesis es un método de pintado que ofrece mayores ventajas que las que ofrece un pintado manual a pesar de ser algo más costoso y menos sencillo. Además, frente a un pintado manual, la cataforesis es un método de pintado regulable en función del voltaje que nos permite estipular con cierto rigor un nuevo módulo elástico.
- Un voltaje de 60 V asegura una cataforesis óptima, cumple con los requisitos de perdurabilidad establecidos y se puede conseguir con una única fuente de alimentación. Además ofrece un módulo elástico final más cercano al del fabricante.
- El pintado manual es otra posible opción que cumple los requisitos principales: económico y duradero. En caso de no poder conseguir los materiales necesarios para el TTS y la cataforesis, que en este caso fueron proporcionados por el Dr. Núñez Díaz, es también una solución viable.

Por lo tanto, podemos concluir que tanto el objetivo principal, como los secundarios, se han podido cumplir de manera satisfactoria.

### 5.2 Líneas Futuras

A continuación se proponen una serie de posibles líneas de trabajo para futuros trabajos:

- Por falta de tiempo, las diferentes anomalías que se han producido a lo largo de este trabajo no se han podido analizar de manera exhaustiva. Se propone, por lo tanto, estudiar y analizar el proceso de cataforesis para conseguir unos resultados más concluyentes.
- Mejora del rendimiento de la cataforesis.
- Comprobar la perdurabilidad de la cataforesis realizada.
- Comprobar la perdurabilidad del pintado manual.
- Estudiar otras vías de protección de los materiales metálicos.


## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Díaz Zuaza, «Recuperación electrolítica de piezas de acero oxidadas,» Universidade de Vigo, 2015.
- [2] J. Lora García, «Optimización de la limpieza electrolítica de sustratos metálicos oxidados,» Universidade de Vigo, 2016.
- [3] M. Núñez Díaz, «Reducción de partículas ocluidas en carrocería cataforizada en una instalación de pintura de automóviles,» Universidade de Vigo, 2015.
- [4] Universidad de Alicante, «Ingeniería Química - Tema 1,» [En línea]. Available: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/8227/1/CorrTema1.pdf>. [Último acceso: 9 Febrero 2017].
- [5] Universidad Politécnica de Valencia, «Fundamentos de corrosión y protección,» [En línea]. Available: [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12\\_2.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/fcm12_2.html). [Último acceso: 1 Febrero 2017].
- [6] ASM International, «The Effects and Economic Impact of Corrosion,» 2000.
- [7] S. Lanchas García-Zarco, «Evaluación del comportamiento de las pinturas mediante la Técnica de Ruido Electroquímico,» 2012.
- [8] Instituto Tecnológico de Canarias, «Electrólisis del agua,» [En línea]. Available: [http://www.itccanarias.org/web/difusion/como\\_funciona/electrolisis/?lang=es](http://www.itccanarias.org/web/difusion/como_funciona/electrolisis/?lang=es). [Último acceso: 12 Febrero 2017].
- [9] D. Zujur y A. Rosales, «Corrosión por corrientes parásitas de un tanque de limpieza electrolítica,» *LatinAm*, 2012.
- [10] M. I. Folgado Martins, «La Práctica de la Limpieza con Láser en objetos metálicos: Hierro - Cobre - Plata,» Universidad Politécnica de Valencia, 2012.
- [11] Pincasa, «Cataforesis,» [En línea]. Available: <http://www.pincasa.es/tratamientos/cataforesis.html>. [Último acceso: 14 Febrero 2017].
- [12] P. Peirón Romero, «Cataforesis,» Universidad de Zaragoza, 3 Septiembre 2012.

- [13] J. L. Jiménez García, J. Navarro Martín, E. Casado Águeda y T. Morales Gómez, Tratamiento y recubrimiento de superficies, Paraninfo, 2010.
- [14] Dpto Ingeniería Mecánica y Construcción, «Módulo de elasticidad,» Universitat Jaume I, 2014. [En línea]. Available: [http://www.mecapedia.uji.es/modulo\\_de\\_elasticidad.htm](http://www.mecapedia.uji.es/modulo_de_elasticidad.htm). [Último acceso: 28 Febrero 2017].
- [15] Centro Universitario de la Defensa, *Práctica 1 - Resistencia de Materiales*, 2016.
- [16] Chemetall, *Ficha Técnica Oxsilan 9907/2*.
- [17] AD Instruments, *Guía del Usuario Fuentes de Alimentación DC series TPR-3D y KPS*.
- [18] J. S. D. Santillana, «Tema 10: Pandeo,» Univesidad de Salamanca, [En línea]. Available: <http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/resistencia-de-materiales-ingeniero-tecnico-en-obras-publicas/contenidos/Tema10-Pandeo.pdf>. [Último acceso: 10 Febrero 2017].
- [19] A. Méndez, «La Guía Química,» 2010. [En línea]. Available: <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/electrolisis>. [Último acceso: 13 Febrero 2017].
- [20] J. I. Anaya Sanz, «La pintura de Cataforesis; presente y futuro,» 1 Octubre 2014. [En línea]. Available: [http://media.firabcn.es/content/S036014/docs/eurocar/1\\_Lapinturadecataforesis\\_presenteyfuturo.pdf](http://media.firabcn.es/content/S036014/docs/eurocar/1_Lapinturadecataforesis_presenteyfuturo.pdf). [Último acceso: 14 Febrero 2017].

## **7 ANEXOS**

# I. ANEXO I: PRECIO JUEGO VARILLAS SIDILAB

 <p><b>Sidilab</b> Sistemas Didácticos de Laboratorio</p>		[REDACTED]																																														
<b>PRESUPUESTO</b>			CENTRO UNIVERSITARIO DE LA DEFENSA -																																													
Num. Presupuesto	Fecha Presupuesto	Página																																														
1170078	31/01/2017	1																																														
CIF / NIF.	Cliente	Teléfono																																														
S2800646H	1325	986 804 830																																														
			PLAZA DE ESPAÑA, 2 36920 - MARIN PONTEVEDRA																																													
Artículo	Descripción	Cantidad	Precio	Total IVA No Inc																																												
17570.00	VARILLAS PLANAS, JUEGO	1,00	269,33	269,33																																												
P	PORTES	1,00	15,00	15,00																																												
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>Contacto</td> <td colspan="3">[REDACTED]</td> </tr> <tr> <td>Forma de Pago</td> <td colspan="3">Transferencia 1 Plazo/s 30 día/s , Fecha Factura</td> </tr> <tr> <td>Forma de Envío</td> <td colspan="3">Portes Pagados</td> </tr> <tr> <td>Garantía</td> <td colspan="3">2 Años</td> </tr> <tr> <td>Validez</td> <td colspan="3">3 meses</td> </tr> <tr> <td>Plazo Entrega</td> <td>A CONFIRMAR CON FABRICA</td> <td colspan="2">Para pedidos inferiores a 300€ (sin IVA) se cargarán 15€ de costes de envío</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>IVA 21,00%</td> <td>Base Imponible</td> <td>284,33</td> </tr> <tr> <td>Base Imponible</td> <td></td> <td>284,33</td> <td>Importe IVA</td> <td>59,71</td> </tr> <tr> <td>Importe IVA</td> <td></td> <td>59,71</td> <td>Importe RE</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Recargo</td> <td></td> <td></td> <td>Total Presupuesto</td> <td>344,04</td> </tr> </table>					Contacto	[REDACTED]			Forma de Pago	Transferencia 1 Plazo/s 30 día/s , Fecha Factura			Forma de Envío	Portes Pagados			Garantía	2 Años			Validez	3 meses			Plazo Entrega	A CONFIRMAR CON FABRICA	Para pedidos inferiores a 300€ (sin IVA) se cargarán 15€ de costes de envío				IVA 21,00%	Base Imponible	284,33	Base Imponible		284,33	Importe IVA	59,71	Importe IVA		59,71	Importe RE		Recargo			Total Presupuesto	344,04
Contacto	[REDACTED]																																															
Forma de Pago	Transferencia 1 Plazo/s 30 día/s , Fecha Factura																																															
Forma de Envío	Portes Pagados																																															
Garantía	2 Años																																															
Validez	3 meses																																															
Plazo Entrega	A CONFIRMAR CON FABRICA	Para pedidos inferiores a 300€ (sin IVA) se cargarán 15€ de costes de envío																																														
		IVA 21,00%	Base Imponible	284,33																																												
Base Imponible		284,33	Importe IVA	59,71																																												
Importe IVA		59,71	Importe RE																																													
Recargo			Total Presupuesto	344,04																																												
Registro Mercantil de Madrid Tomo 21.589 Libro 0 Folio 31 Sección 8 Hoja M-384143																																																



## II. ANEXO II: FOTOGRAFÍAS PIEZAS INICIALMENTE

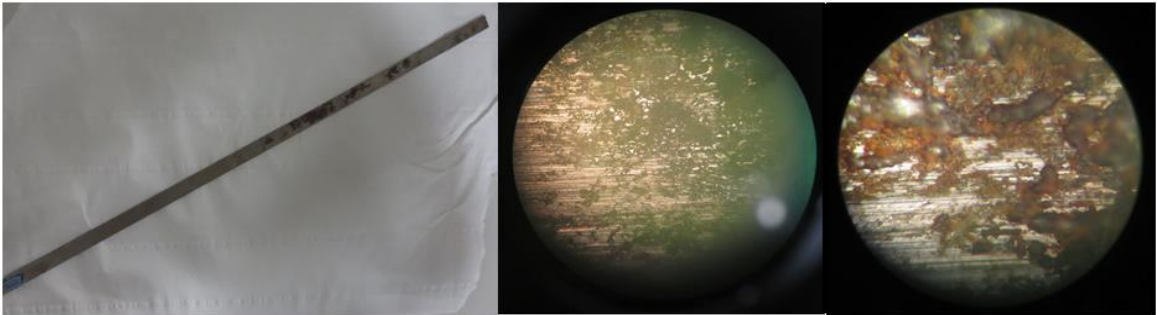


Figura II-1 Pieza 1 Inicialmente

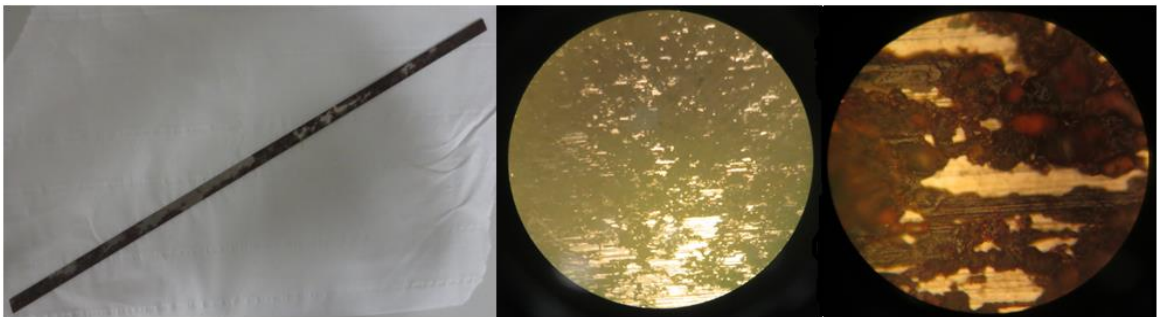


Figura II-2 Pieza 2 Inicialmente

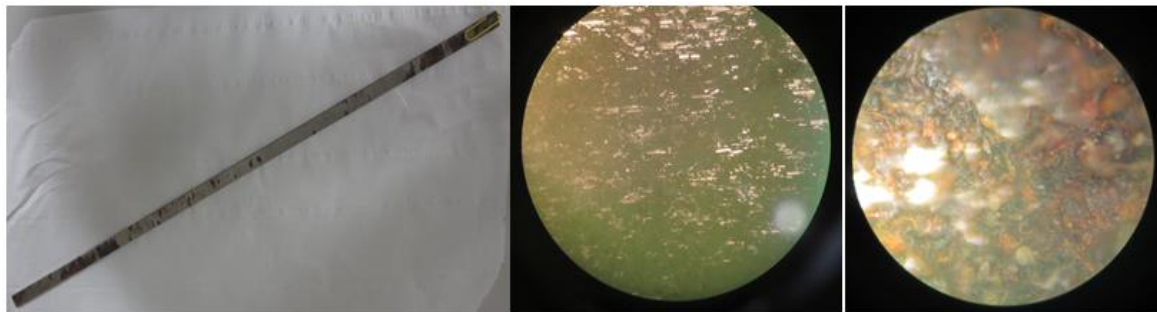


Figura II-3 Pieza 3 Inicialmente

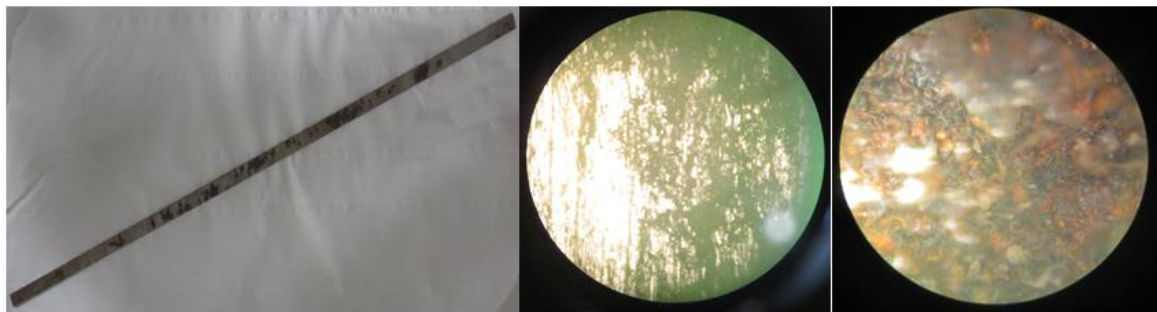
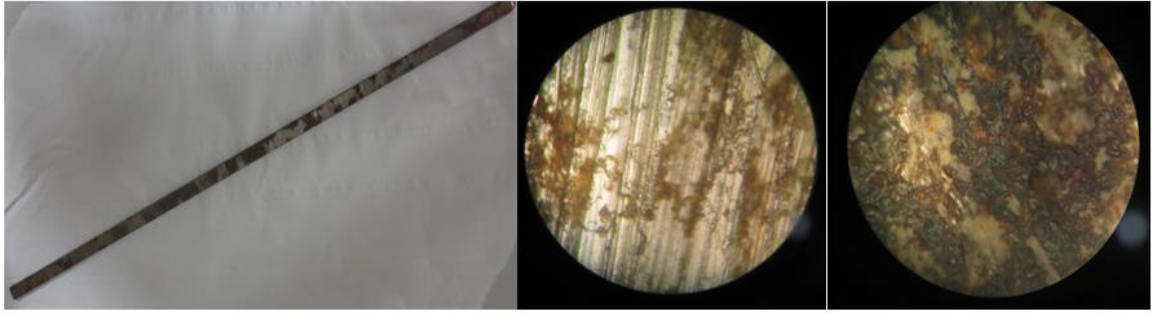
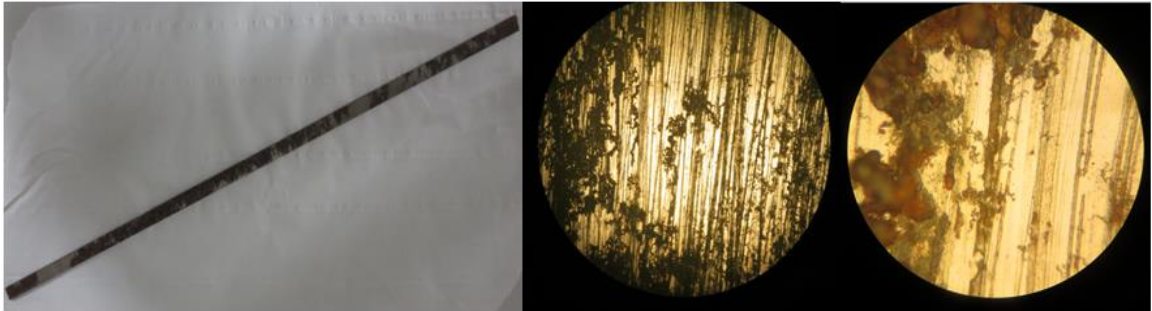


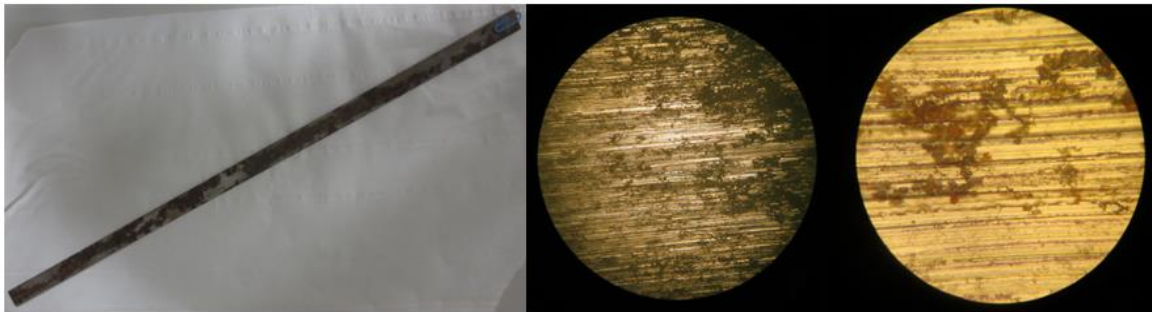
Figura II-4 Pieza 4 Inicialmente



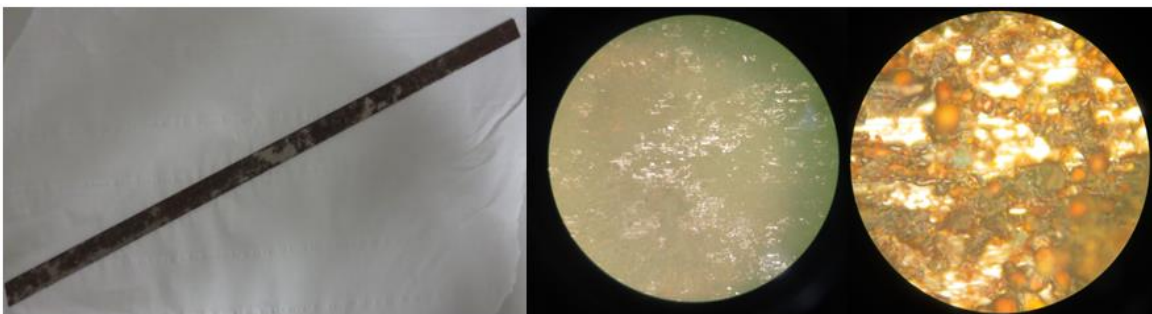
**Figura II-5 Pieza 5 Inicialmente**



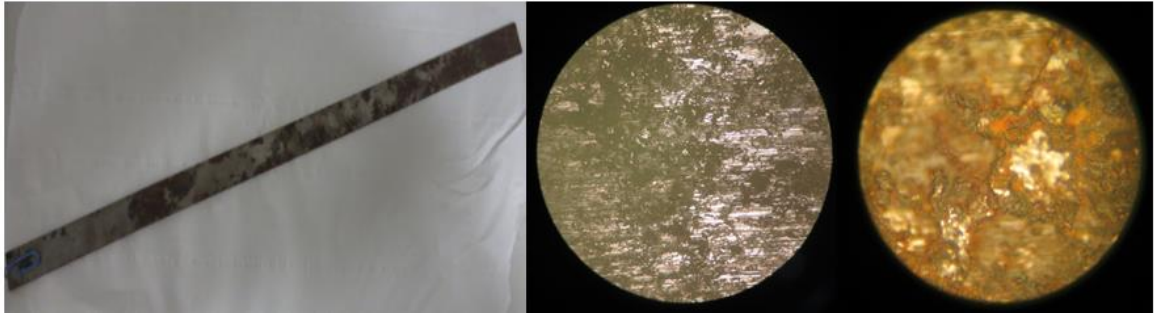
**Figura II-6 Pieza 6 Inicialmente**



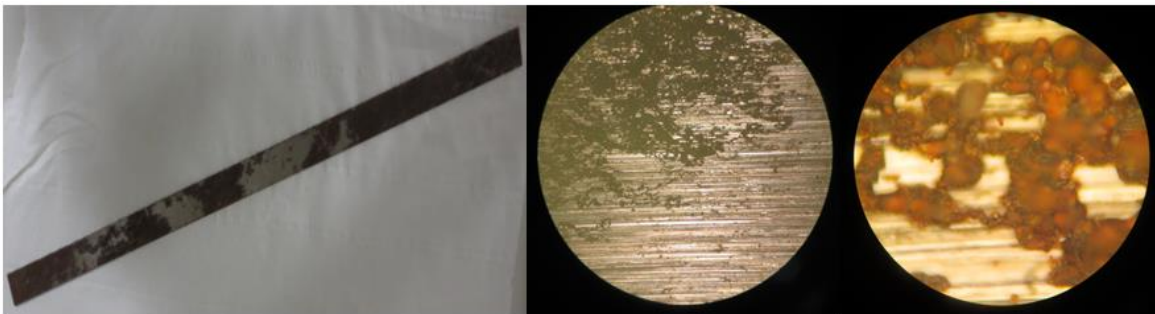
**Figura II-7 Pieza 7 Inicialmente**



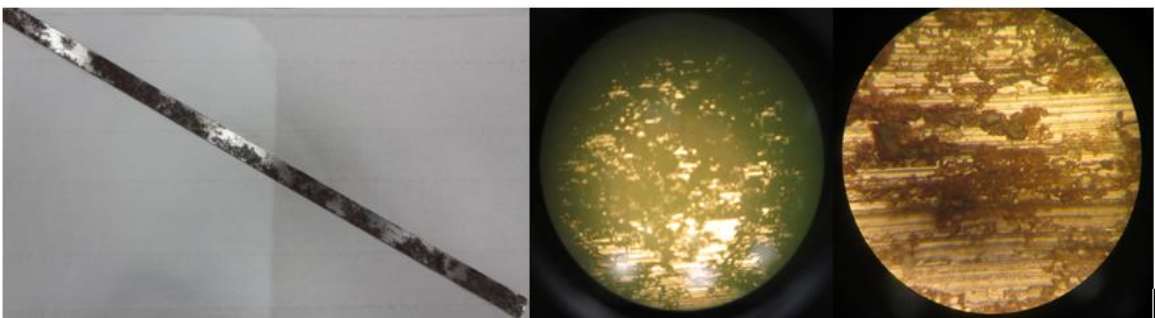
**Figura II-8 Pieza 8 Inicialmente**



**Figura II-9 Pieza 9 Inicialmente**



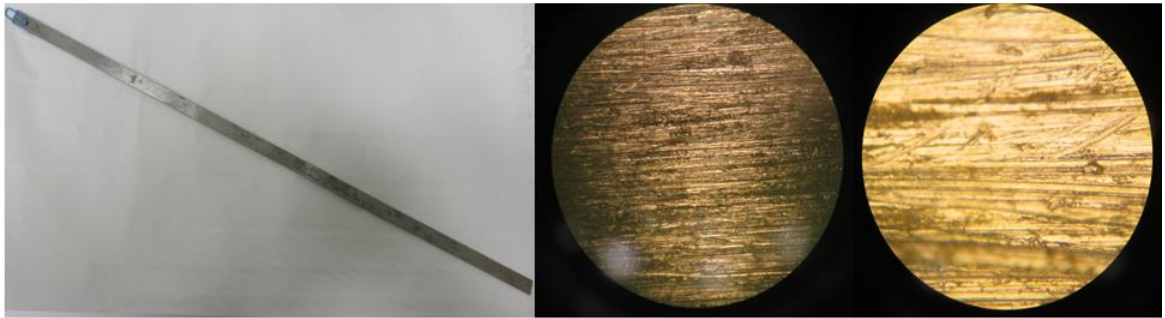
**Figura II-10 Pieza 10 Inicialmente**



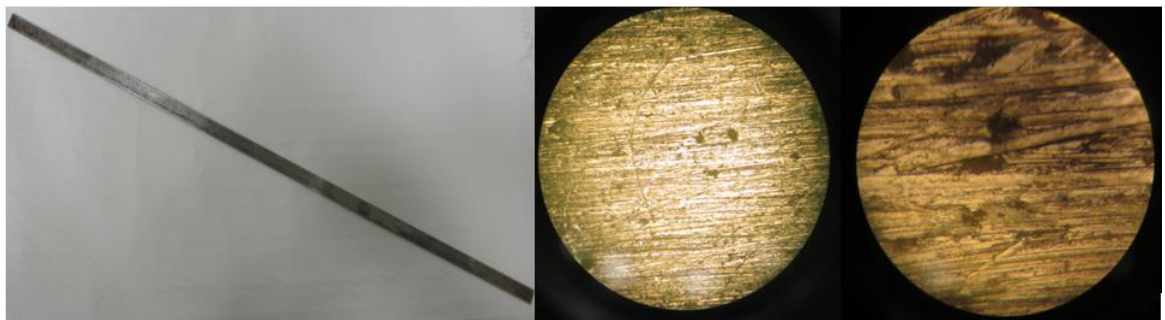
**Figura II-11 Pieza 11 Inicialmente**



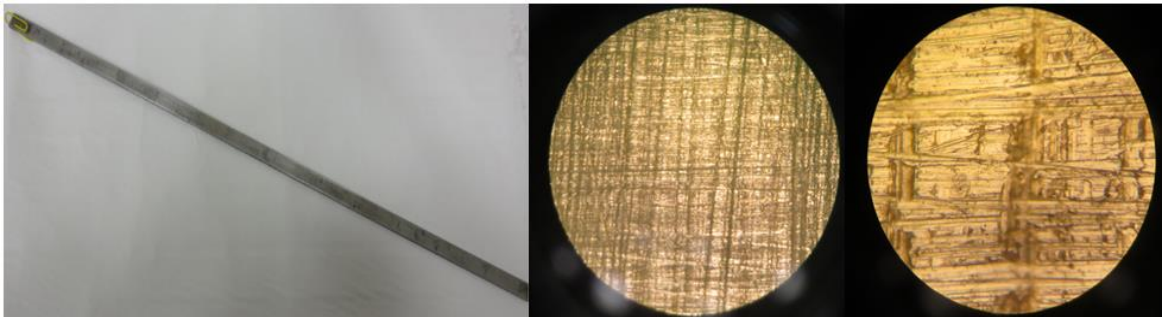
### III. ANEXO III: FOTOGRAFÍAS PIEZAS TRAS LIMPIEZA



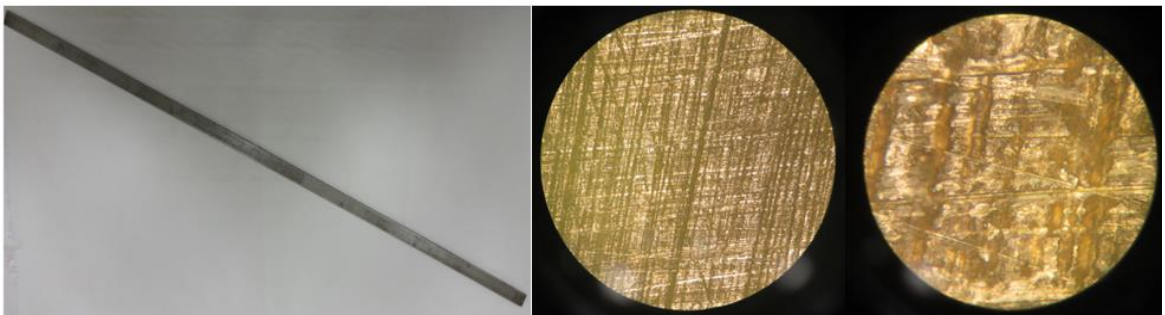
**Figura III-1 Pieza 1 Tras Limpieza**



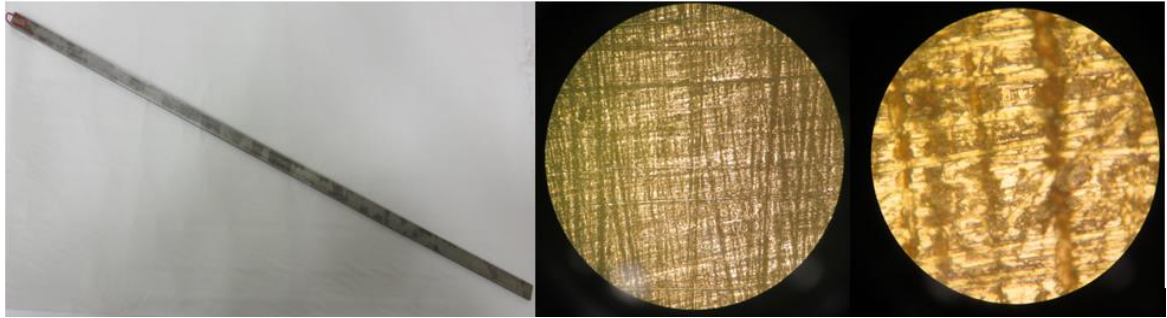
**Figura III-2 Pieza 2 Tras Limpieza**



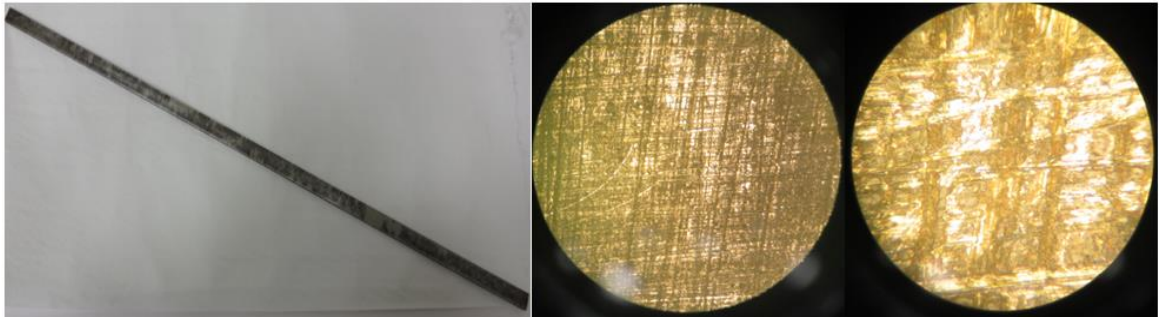
**Figura III-3 Pieza 3 Tras Limpieza**



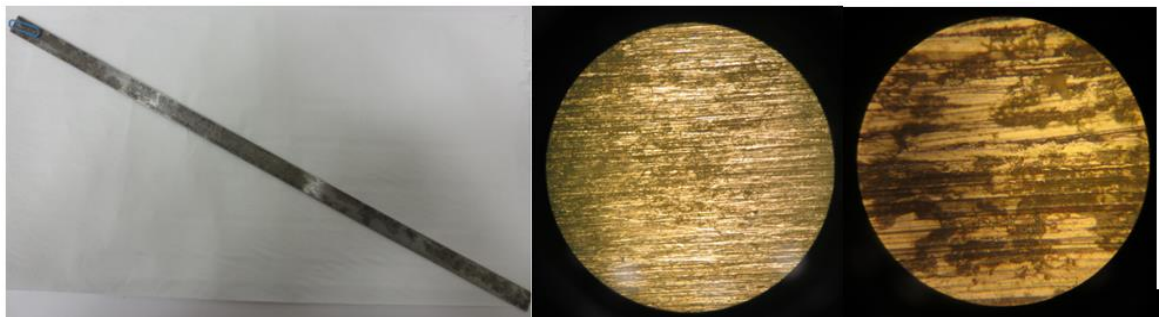
**Figura III-4 Pieza 4 Tras Limpieza**



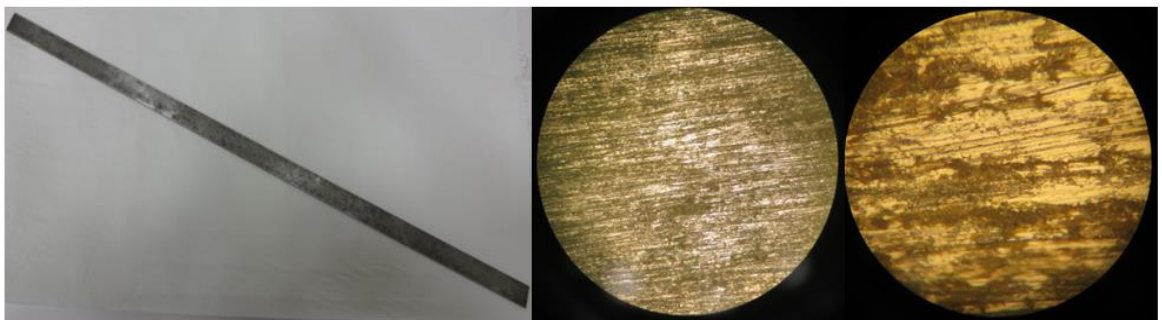
**Figura III-5 Pieza 5 Tras Limpieza**



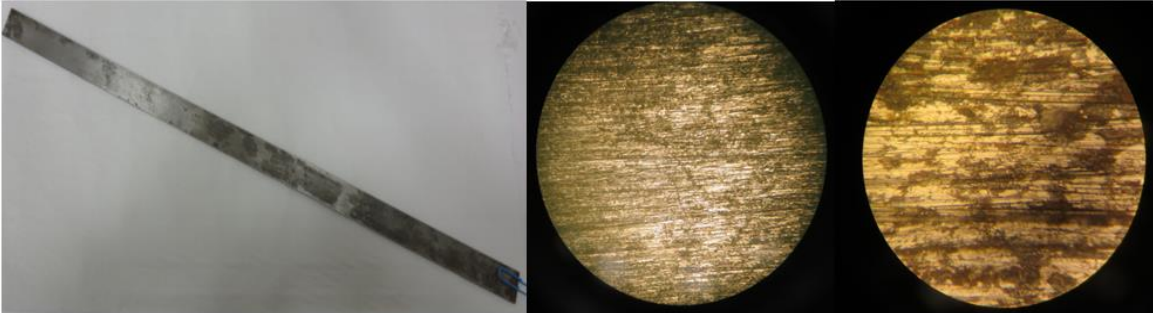
**Figura III-6 Pieza 6 Tras Limpieza**



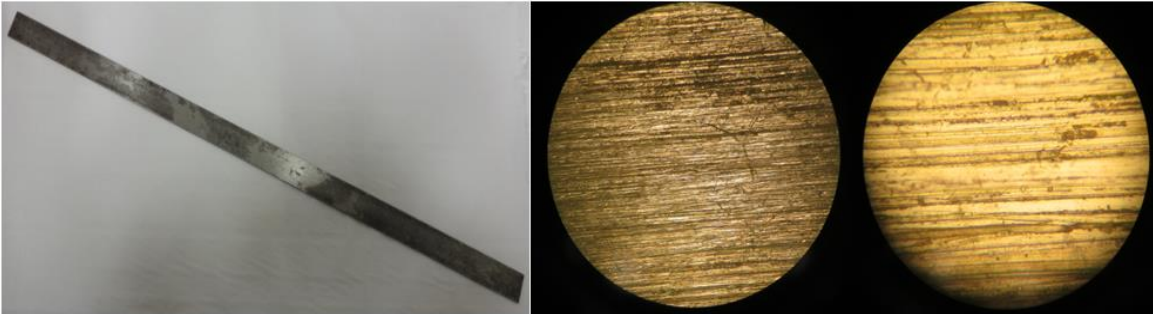
**Figura III-7 Pieza 7 Tras Limpieza**



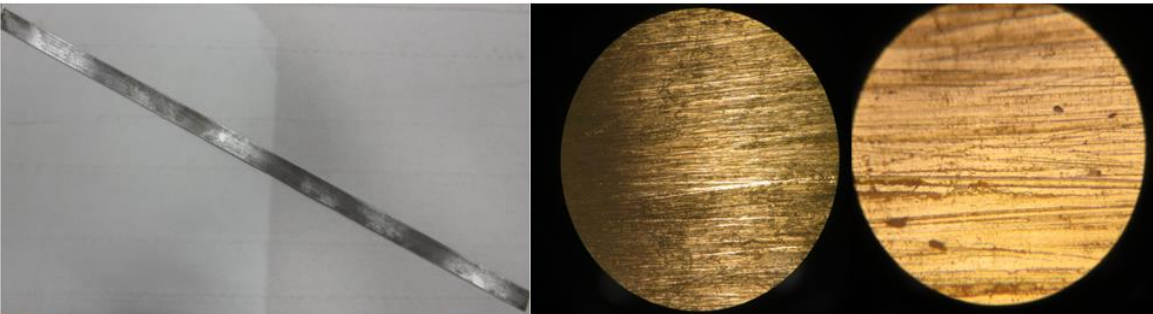
**Figura III-8 Pieza 8 Tras Limpieza**



**Figura III-9 Pieza 9 Tras Limpieza**



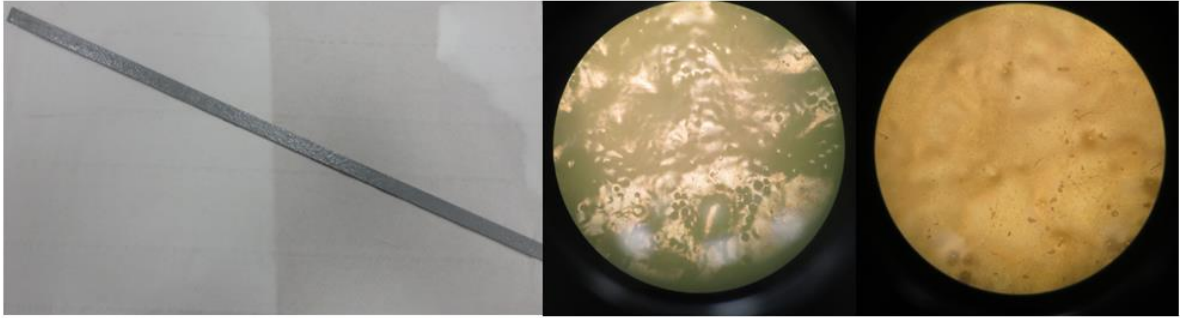
**Figura III-10 Pieza 10 Tras Limpieza**



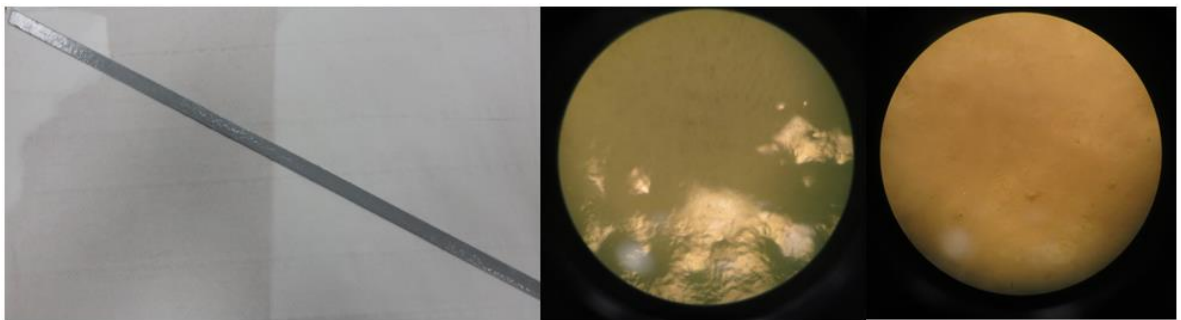
**Figura III-11 Pieza 11 Tras Lijado**



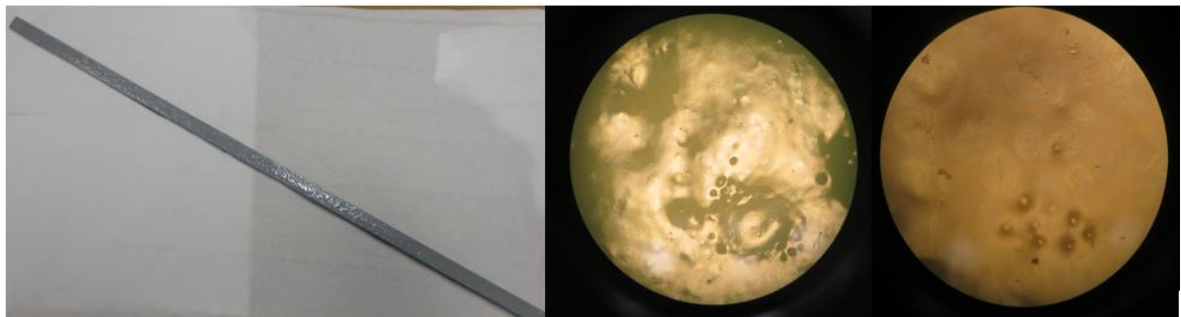
## IV. ANEXO IV: FOTOGRAFÍAS PIEZAS TRAS PINTADO



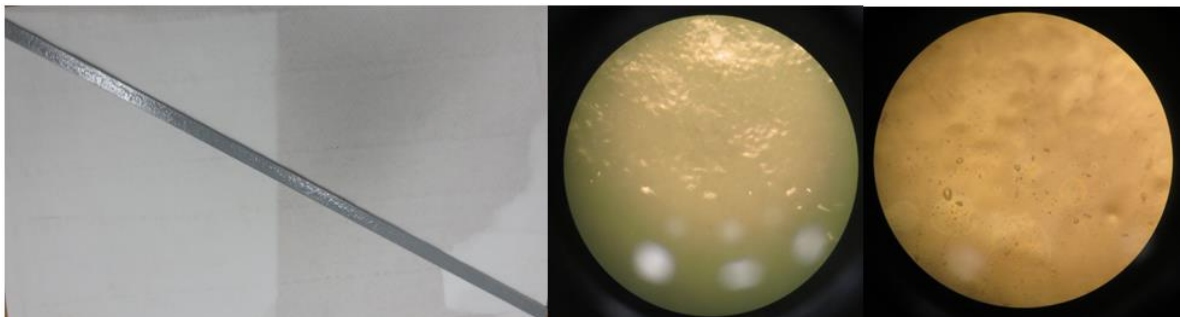
**Figura IV-1 Pieza 1 Tras Cataforesis**



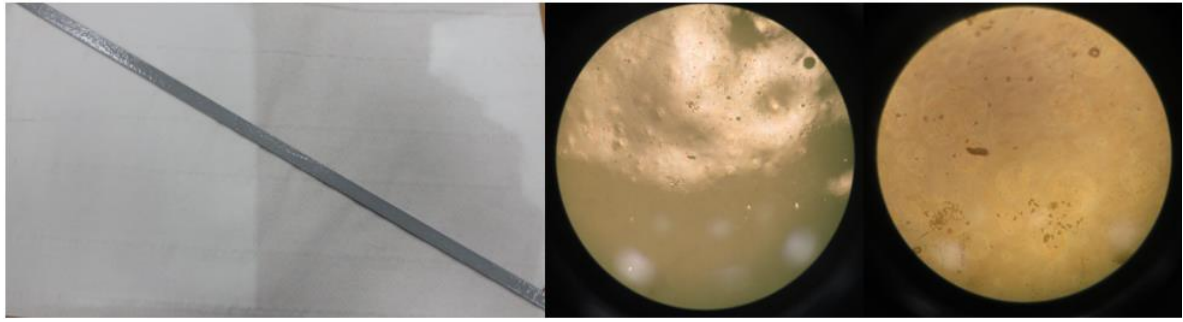
**Figura IV-2 Pieza 2 Tras Cataforesis**



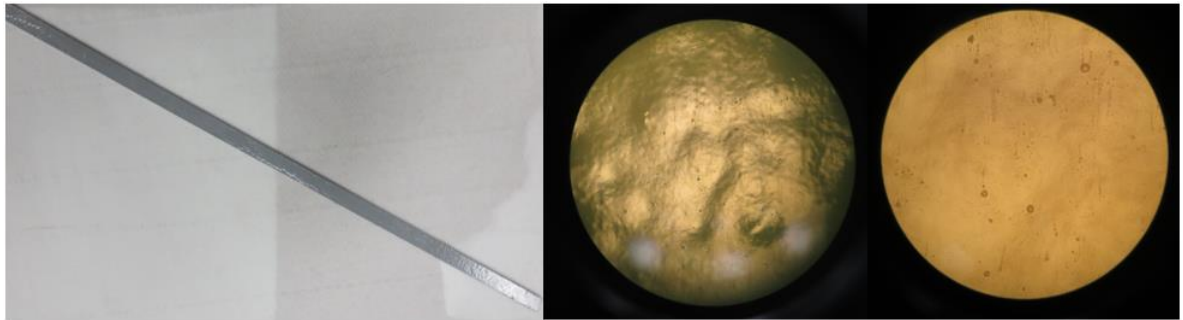
**Figura IV-3 Pieza 3 Tras Cataforesis**



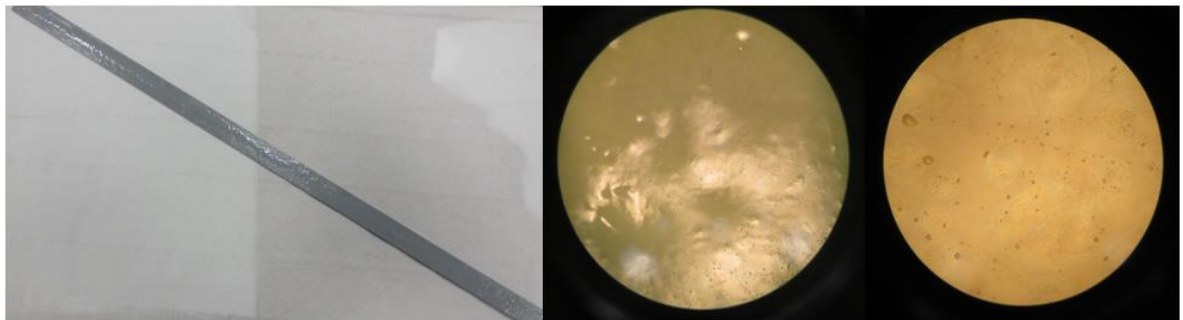
**Figura IV-4 Pieza 4 Tras Cataforesis**



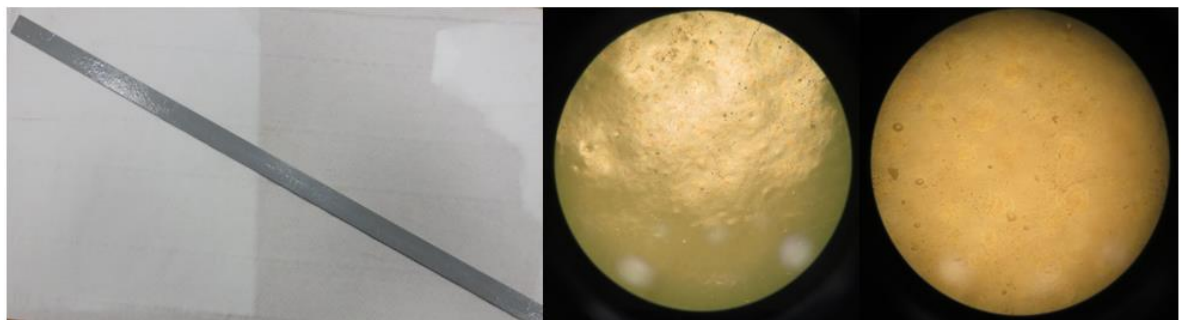
**Figura IV-5 Pieza 5 Tras Cataforesis**



**Figura IV-6 Pieza 6 Tras Cataforesis**

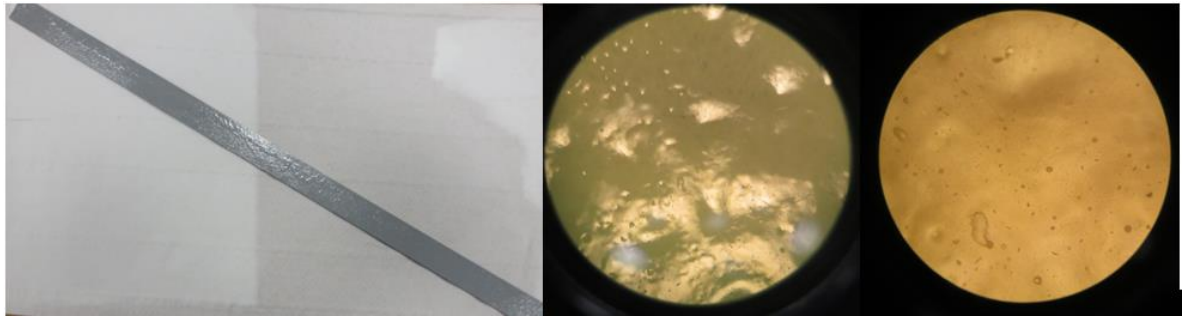


**Figura IV-7 Pieza 7 Tras Cataforesis**

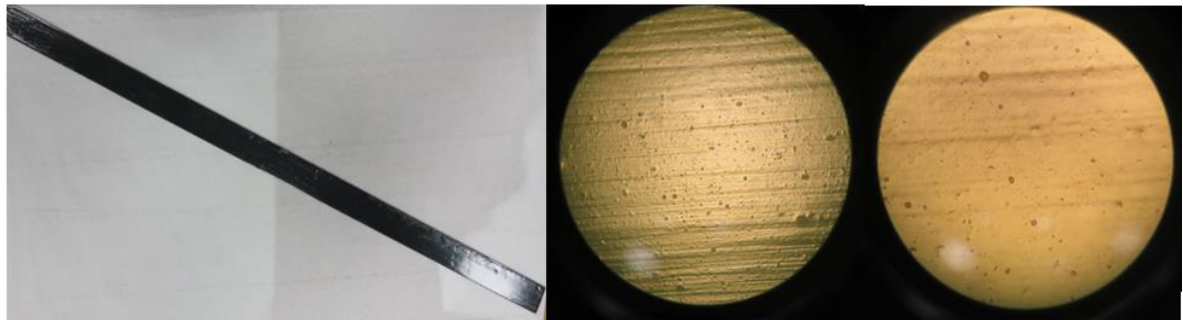


**Figura IV-8 Pieza 8 Tras Cataforesis**

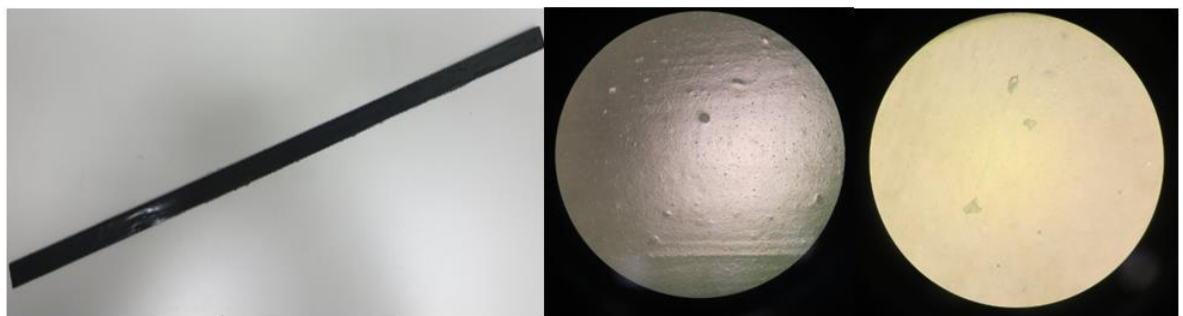




**Figura IV-9 Pieza 9 Tras Cataforesis**



**Figura IV-10 Pieza 10 Tras Pintado Manual**



**Figura IV-11 Pieza 11 Tras Pintado Manual**

## V. ANEXO V: ENSAYOS MÓDULO DE ELASTICIDAD

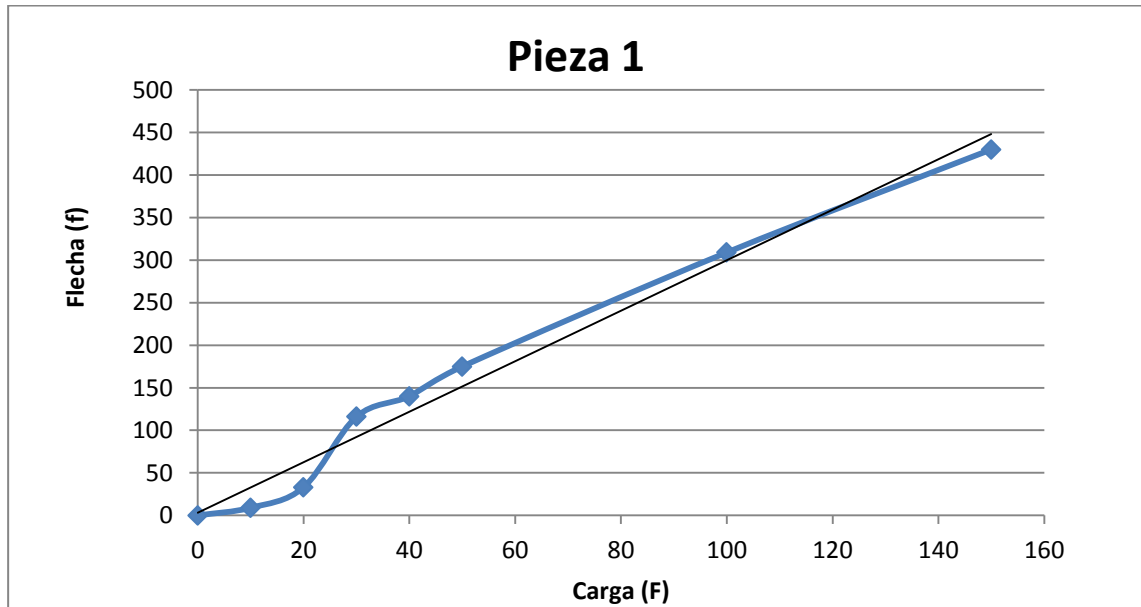


Figura V-1 Ensayo Módulo Elástico Pieza 1

VARILLA 10 x 1,5 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
10	9
20	33
30	116
40	140
50	175
100	309
150	430

Tabla 12 Ensayo Módulo Elástico Pieza 1

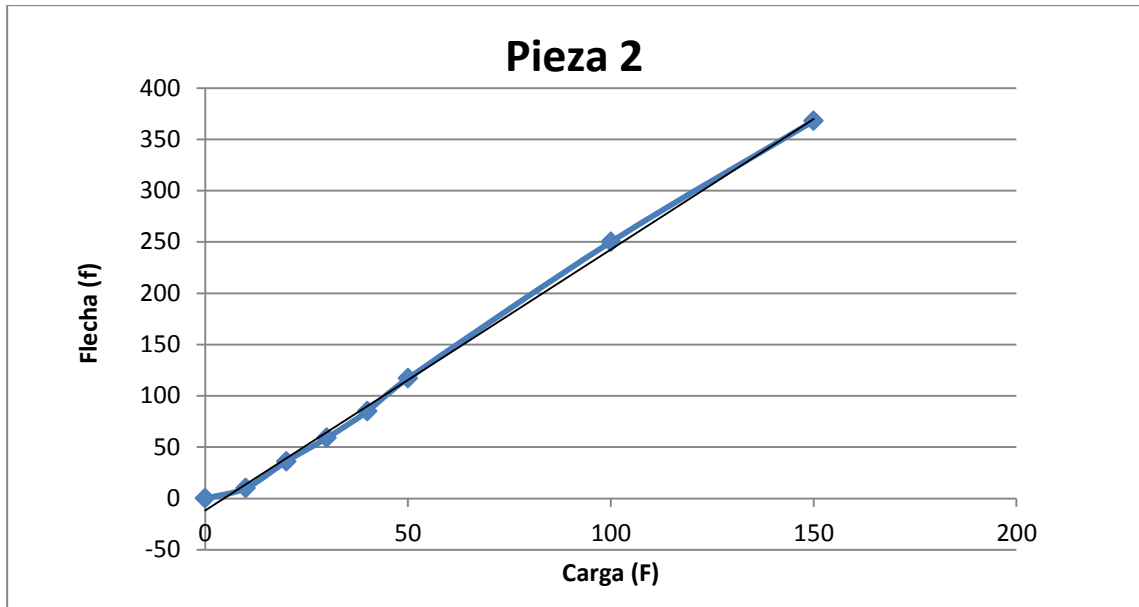


Figura V-2 Ensayo Módulo Elástico Pieza 2

VARILLA 10 x 1,5 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
10	10
20	36
30	59
40	85
50	117
100	250
150	368

Tabla 13 Ensayo Módulo Elástico Pieza 2

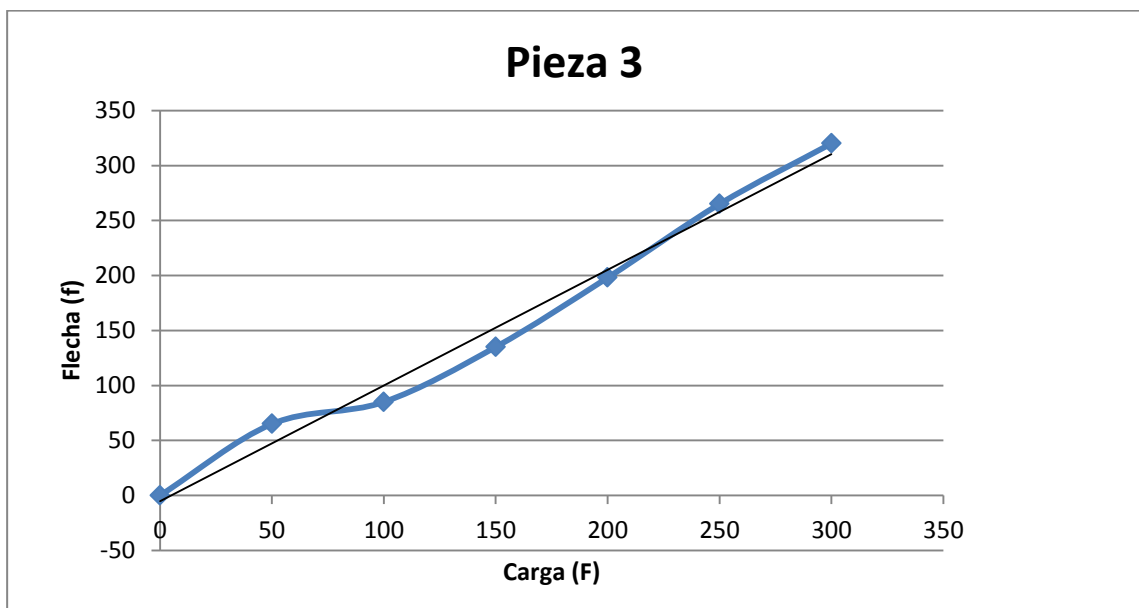


Figura V-3 Ensayo Módulo Elástico Pieza 3

VARILLA 10 x 2 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
50	65
100	85
150	135
200	198
250	265
300	320

Tabla 14 Ensayo Módulo Elástico Pieza 3

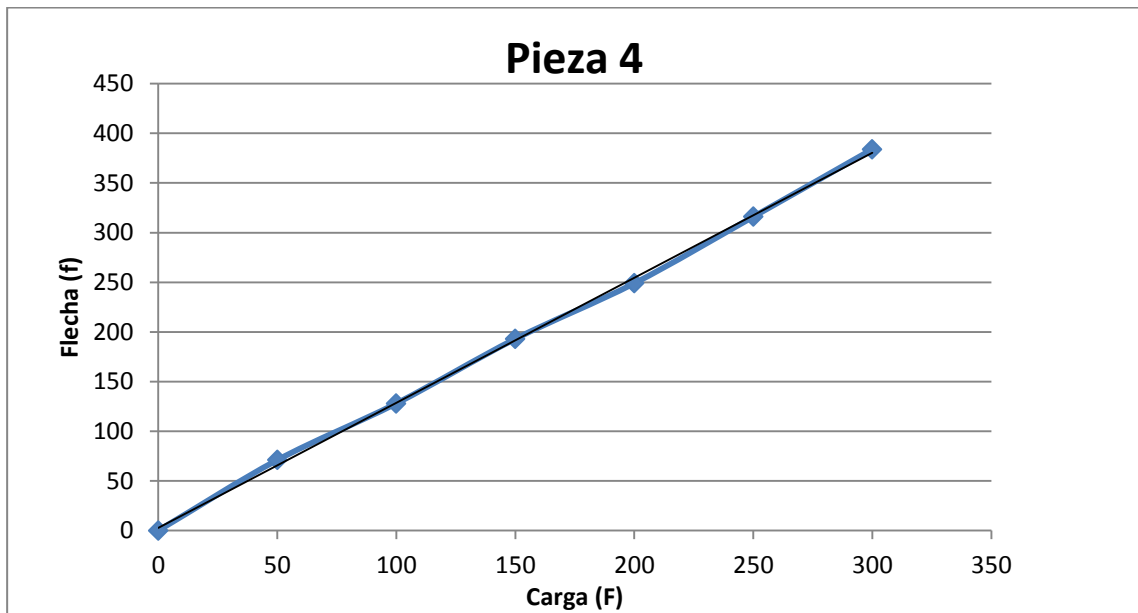


Figura V-4 Ensayo Módulo Elástico Pieza 4

VARILLA 10 x 2 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
50	71
100	128
150	193
200	249
250	316
300	384

Tabla 15 Ensayo Módulo Elástico Pieza 4

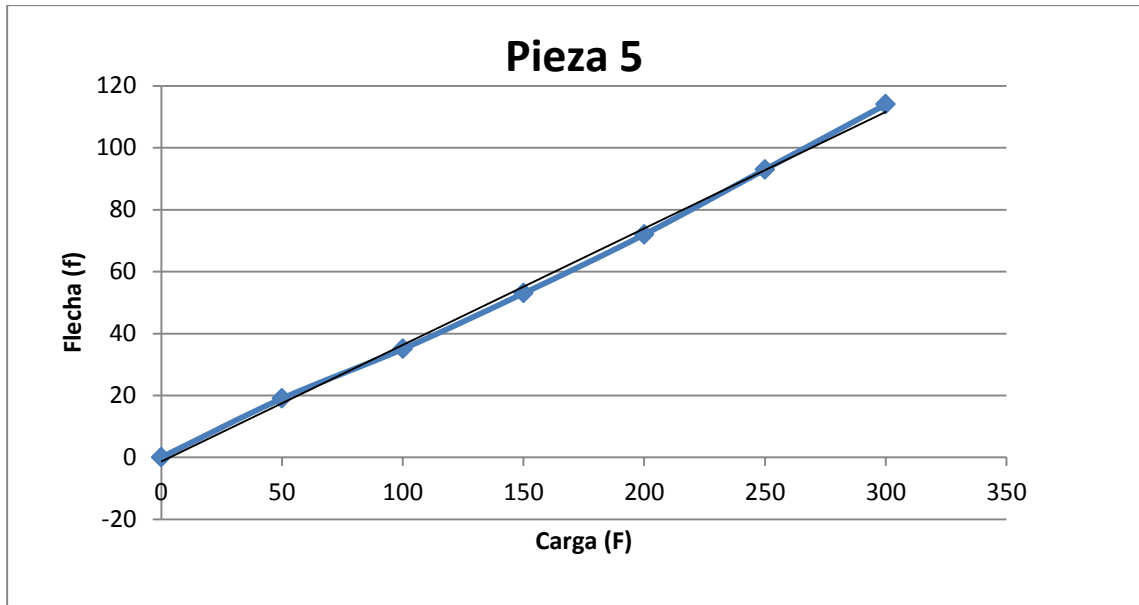


Figura V-5 Ensayo Módulo Elástico Pieza 5

VARILLA 10 x 3 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
50	19
100	35
150	53
200	72
250	93
300	114

Tabla 16 Ensayo Módulo Elástico Pieza 5

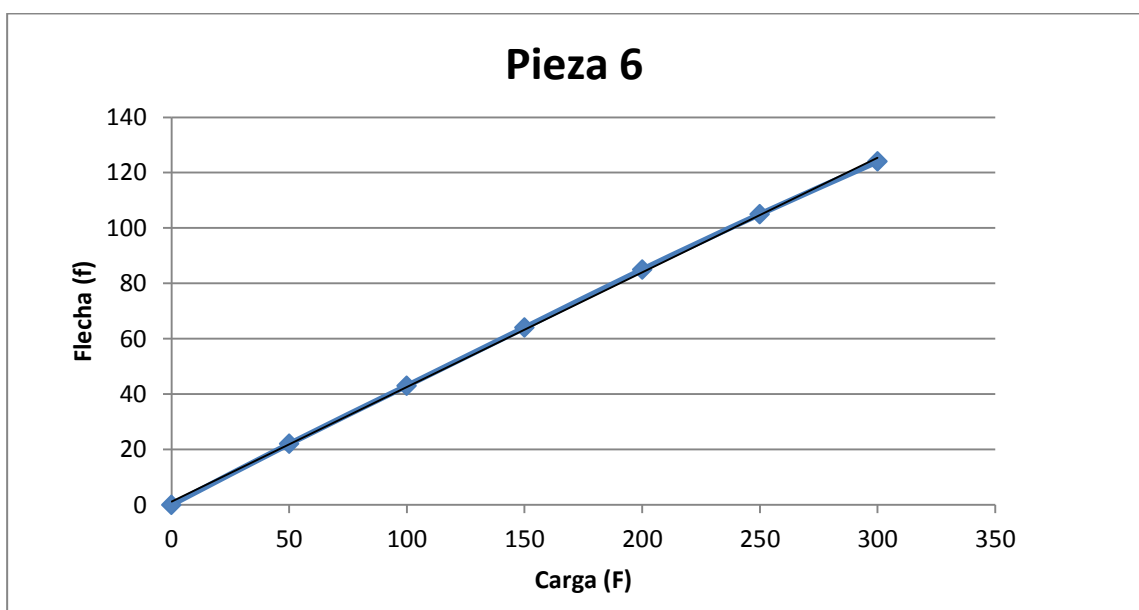


Figura V-6 Ensayo Módulo Elástico Pieza 6

VARILLA 10 x 3 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
50	22
100	43
150	64
200	85
250	105
300	124

Tabla 17 Ensayo Módulo Elástico Pieza 6

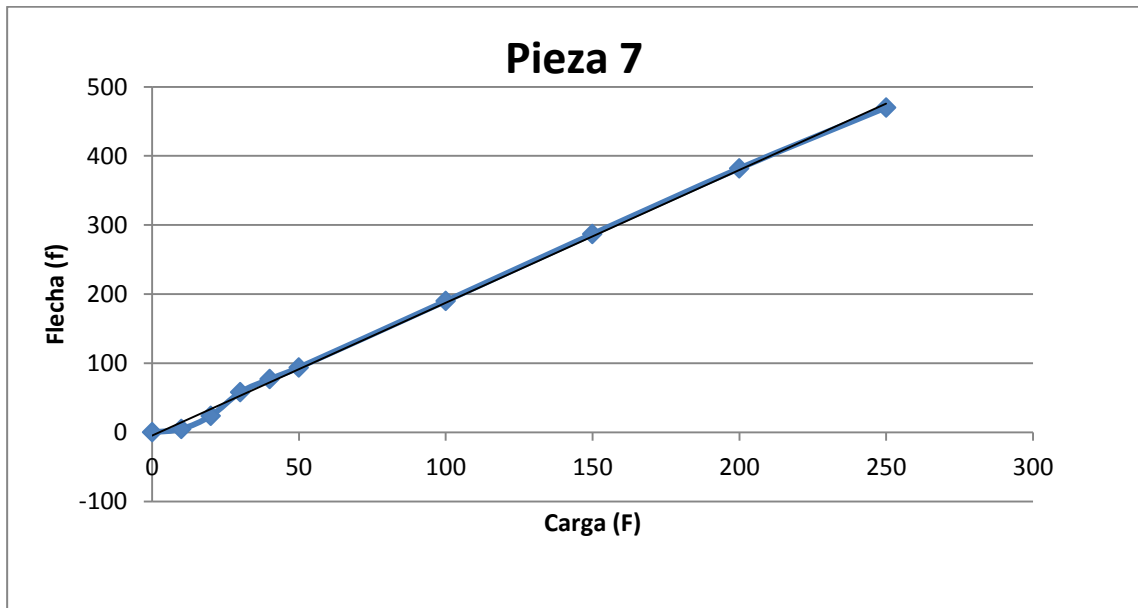


Figura V-7 Ensayo Módulo Elástico Pieza 7

VARILLA 20 x 1,5 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
10	5
20	24
30	58
40	77
50	94
100	190
150	287
200	382
250	470

Tabla 18 Ensayo Módulo Elástico Pieza 7

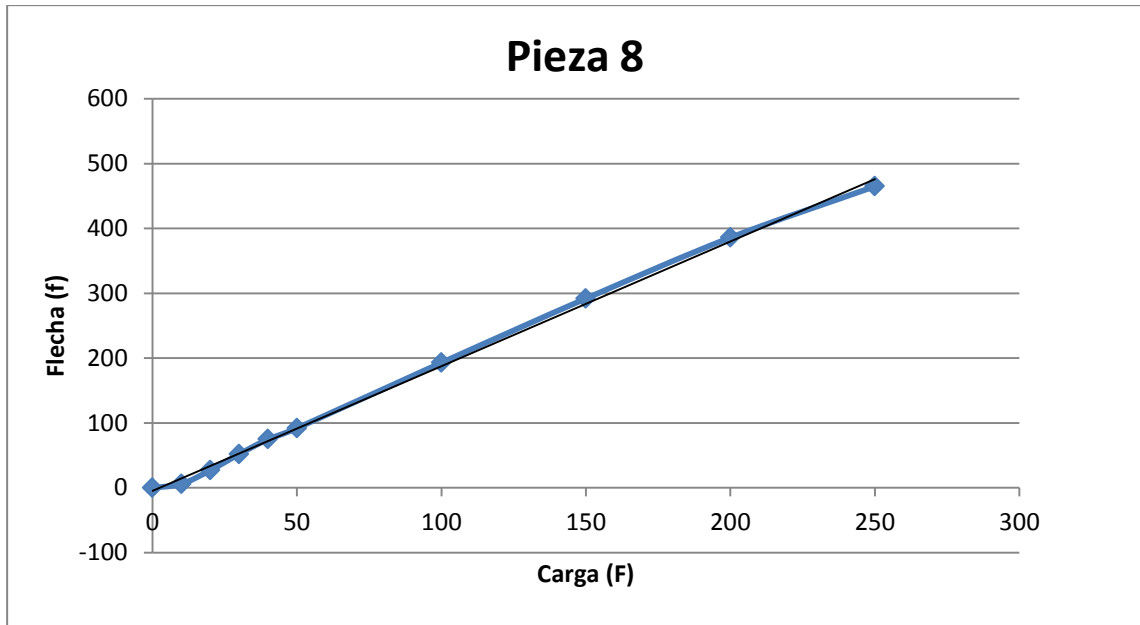
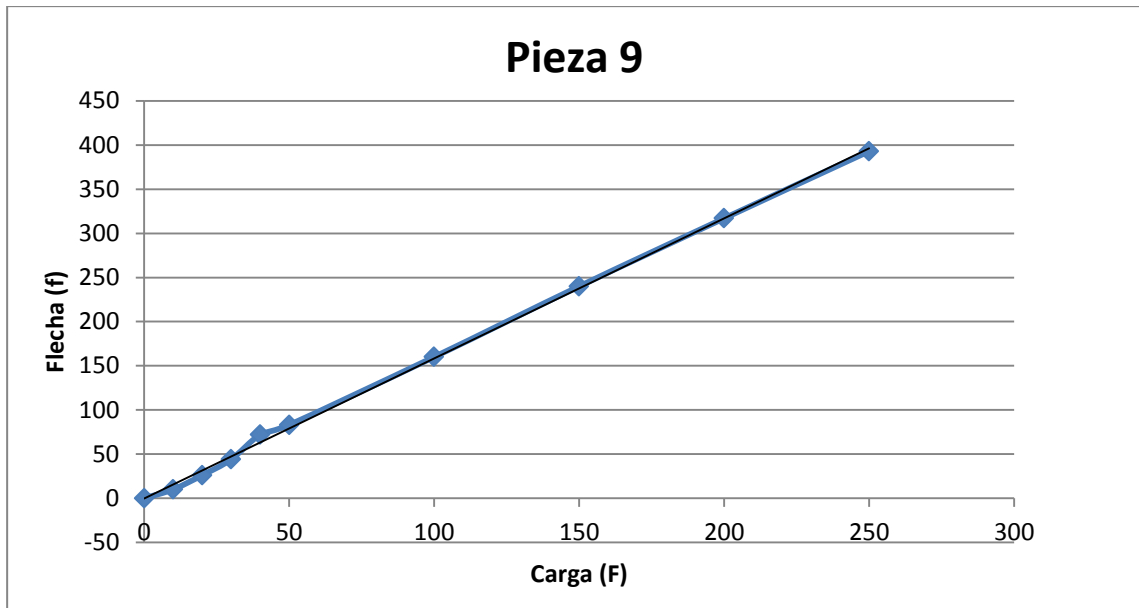


Figura V-8 Ensayo Módulo Elástico Pieza 8

VARILLA 20 x 1,5 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
10	6
20	27
30	52
40	75
50	92
100	193
150	292
200	386
250	465

Tabla 19 Ensayo Módulo Elástico Pieza 8

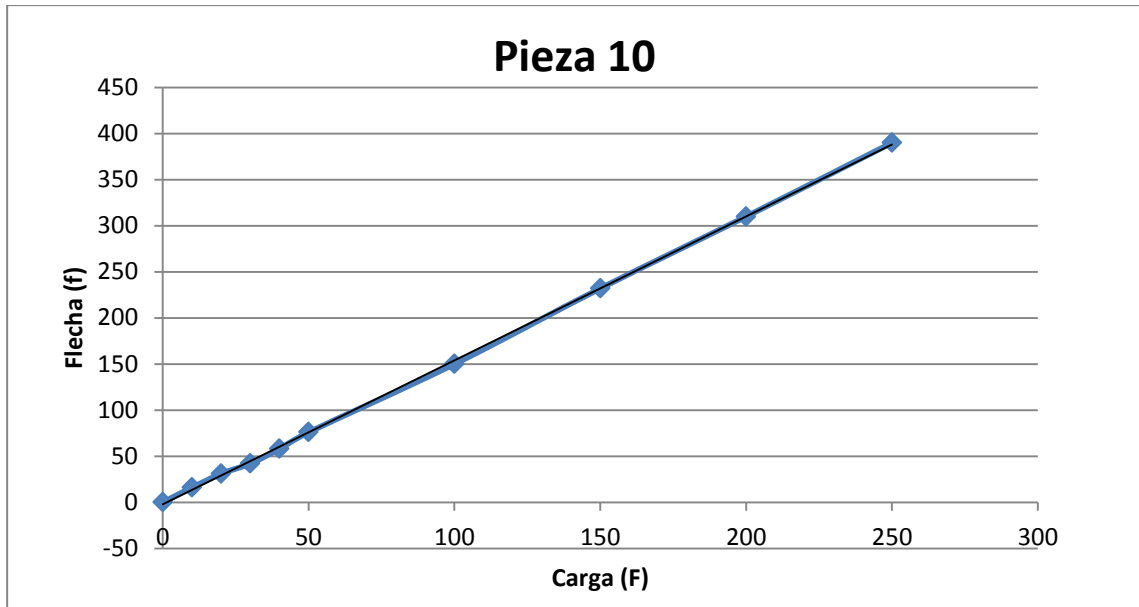


**Figura V-9 Ensayo Módulo Elástico Pieza 9**

VARILLA 30 x 1,5 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
10	10
20	26
30	44
40	72
50	83
100	160
150	240
200	317
250	393

**Tabla 20 Ensayo Módulo Elástico Pieza 9**





**Figura V-10 Ensayo Módulo Elástico Pieza 10**

VARILLA 30 x 1,5 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
10	16
20	31
30	42
40	58
50	76
100	150
150	232
200	310
250	390

**Tabla 21 Ensayo Módulo Elástico Pieza 10**

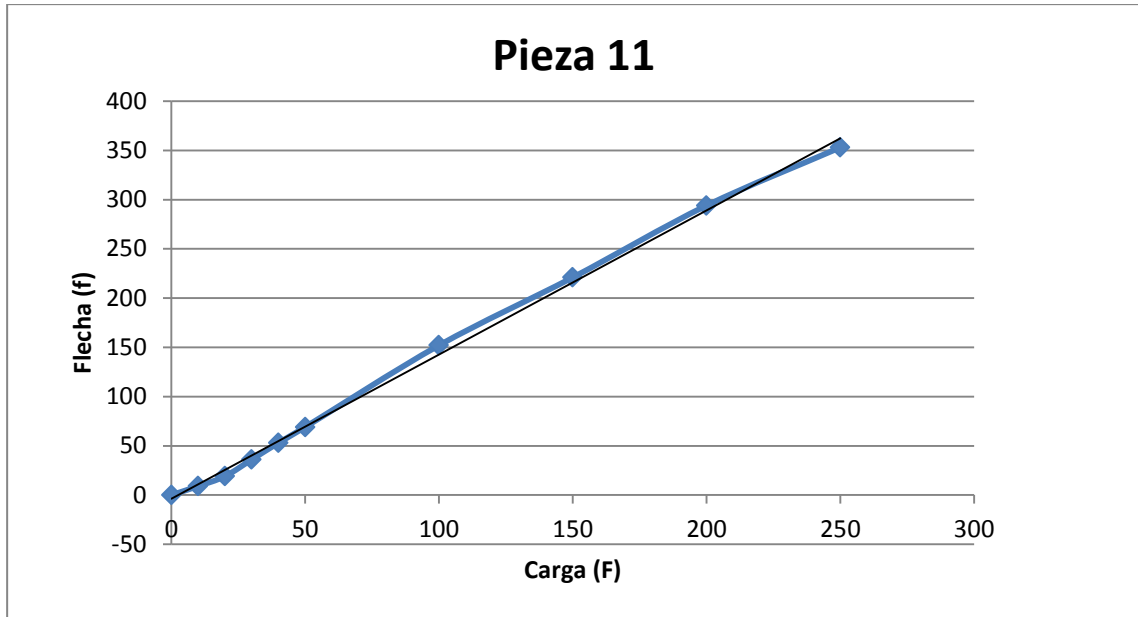


Figura V-11 Ensayo Módulo Elástico Pieza 11

VARILLA 20 x 1,5 x 500 (mm)	
CARGA (g)	FLECHA (0.01 mm)
0	0
10	9
20	19
30	36
40	53
50	69
100	152
150	221
200	294
250	353

Tabla 22 Ensayo Módulo Elástico Pieza 11

## VI. ANEXO VI: FICHA TÉCNICA OXSILAN [16]

---

**Chemetall**

Ficha Técnica

---

### **OXSILAN® 9907/2**

#### **Ámbito**

**OXSILAN 9907/2** es un líquido multifunción para el pre-tratamiento antes de pintura a base de silanos.

Este proceso puede utilizarse en operaciones de proceso de una amplia gama de materiales de acero, acero galvanizado, aluminio y aleaciones.

**OXSILAN 9907/2** puede reemplazar los sistemas de fosfato de bajo zinc. Este proceso único mejora el rendimiento de la mayoría de sistemas de pintura.

La aplicación puede efectuarse por aspersión o inmersión.

#### **Características físico-químicas**

Aspecto:	Líquido transparente
Color:	De incoloro a rojizo
Densidad (kg/l) a 20°C:	1,110 ± 0,030
pH concentrado:	< 2
Viscosidad copa ISO 2431 diámetro 4 a 23°C:	15 seg.
% Mn:	0,81 ± 0,07%
% Zr:	3,56 ± 0,36%
% NO <sub>3</sub> :	6,0 %
% F:	3,2 %

## VII. ANEXO VII: FICHA TÉCNICA FUENTE DE ALIMENTACIÓN [17]

Modelo	Rango Tensión de salida	Rango Corriente de salida	Visualización de tensión/corriente	Precisión de la pantalla
TPR3003-3D	Dual 0-30V ajustable	Dual 0-3A ajustable	Pantalla digital	$\pm 1\% \pm 1$

### Características de tensión

Modelo	Estabilidad de tensión	Estabilidad de carga	Rizado y ruido
Serie TPR-3D	$\leq 0,01\% \pm 2\text{mV}$	$\leq 0,01\% \pm 2\text{mV}$	$\leq 0,5\text{mV}_{\text{rms}}$ (valor eficaz)

### Características de corriente

Modelo	Estabilidad de corriente	Rizado y ruido
Serie TPR-3D	$\leq 0,2\% \pm 3\text{mA}$	$\leq 1\text{mA}_{\text{rms}}$